

**METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO DE TORNILLOS DE MAQUINAS
EXTRUSORAS MONOHUSILLO**

**PAOLA ANDREA GUTIÉRREZ MORALES
JIMMY FERNANDO BORNACELLI CASTILLO**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE OCCIDENTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN
PROGRAMA DE INGENIERIA DE PRODUCCIÓN
SANTIAGO DE CALI
2006**

**METODOLOGIA PARA EL DISEÑO DE TORNILLOS DE MAQUINAS
EXTRUSORAS MONOHUSILLO**

**PAOLA ANDREA GUTIÉRREZ MORALES
JIMMY FERNANDO BORNACELLI CASTILLO**

Trabajo de grado para optar al título
de Ingenieros de Producción

Director
JUAN CARLOS OTERO JARAMILLO
Ingeniero Mecánico

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE OCCIDENTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN
PROGRAMA DE INGENIERIA DE PRODUCCIÓN
SANTIAGO DE CALI
2006**

Nota de Aceptación:

Aprobado por el comité de Grado en cumplimiento de los requisitos Exigidos por la universidad Autónoma de Occidente para optar al título de Ingenieros de Producción

Ing. Fabio Lezano

Firma del jurado

Santiago de Cali, 21 de Julio de 2006

A las tres personas más importantes de mi vida y sin las cuales no estaría donde estoy ahora. Esto por ti papi, mami y rossy. Y a ti precillo por la confianza y el apoyo durante este tiempo.

Paola

A ti "pipita" mi linda mamá, por luchar para proporcionarme esta gran oportunidad, por todos tus esfuerzos e incondicional amor, a pollito mi segunda mamá por su dedicación y cariño, y a cada uno de los integrantes de mi familia porque gracias a ellos soy quien soy. Y a Adri, la mujer que me ha dado todo su corazón y apoyo.

Jimmy

AGRADECIMIENTOS

A Dios por nuestras vidas, por permitirnos realizar este gran sueño, por proporcionarnos la fuerza y los medios para conseguirlo, por la vida, la salud y el amor de los nuestros.

A la universidad AUTÓNOMA DE OCCIDENTE por abrirnos sus puertas y brindarnos las bases para poder ser los profesionales que somos.

Al ingeniero Juan Carlos Otero Jaramillo por su amistad, sus enseñanzas, su apoyo y el empuje que nos inculco durante este proceso.

A todos los profesores que no solo fueron solamente docentes dentro del aula, sino amigos fuera de ella.

A las empresas donde realizamos las prácticas por permitirnos tomar un poco de experiencia, por el entendimiento en los momentos de mayor dificultad.

A todos nuestros compañeros y amigos de la U por todos los buenos momentos compartidos.

CONTENIDO

	Pág.
GLOSARIO	15
RESUMEN	16
INTRODUCCIÓN	17
1 OBJETIVO GENERAL	19
1.1 OBJETIVOS ESPECIFICOS	19
2 MARCO TEORICO	20
3 PROCESO DE EXTRUSIÓN	21
3.1 MAQUINA EXTRUSORA	23
3.2 MATRIZ DE EXTRUSIÓN O CABEZAL	24
3.3 UNIDAD DE CALIBRACIÓN Y ENFRIAMIENTO	24
3.4 UNIDAD DE TRACCIÓN O BOBINADO	26
3.5 PRINCIPALES APLICACIONES DE LAS POLIOLEFINAS EN LA EXTRUSIÓN	27
4 EXTRUSORA	29
4.1 TIPOS DE EXTRUSORAS	30
4.2 ELEMENTOS CONSTITUYENTES DE UNA MAQUINA EXTRUSORA	32
4.2.1 Tolva alimentadora	32
4.2.2 Cilindro, Barril o Cuerpo de la Maquina	33

4.2.3	Cabezal	34
4.2.3.1	Boquilla	35
4.2.3.2	Plato Rompedor	35
4.3	EXTRUSORAS DE TORNILLO	36
5	TORNILLOS EXTRUSORES PARA MAQUINAS MONOHUSILLO	38
5.1	DEFINICIÓN DE TORNILLO	38
5.2	FUNCIONES DE LOS TORNILLOS EXTRUSORES	41
5.3	TIPOS DE TORNILLOS PARA MAQUINAS MONOHUSILLO	41
5.4	PARTES DE UN TORNILLO CONVENCIONAL	43
5.4.1	Zona de Alimentación	44
5.4.1.1	Sección de Alimentación - Profundidades y Longitudes	45
5.4.2	Zona de Compresión	46
5.4.3	Zona de Dosificación	47
6	MODELAMIENTO MATEMÁTICO DEL TORNILLO EXTRUSOR	48
6.1	ZONA 1: TRANSPORTE DE SÓLIDOS	49
6.2	ZONA 2: FUSIÓN Y PLASTIFICACIÓN	52
7	MODELO DE FUSIÓN	54
7.1	RESEÑA HISTÓRICA	54
7.2	FUSIÓN DEL POLÍMERO	55
7.3	CONSIDERACIONES PLANTEADAS POR EL MODELO DE FUSIÓN	57

7.4	VELOCIDAD RESULTANTE	58
7.5	LA TEMPERATURA	61
7.6	RELACIÓN ENTRE EL ANCHO DE LA CAMA SÓLIDA Y EL ANCHO DEL CANAL	63
7.7	DESARROLLO MATEMÁTICO DEL MODELO DE FUSIÓN	65
8	MODELO DE PRESIÓN	72
8.1	RESEÑA HISTÓRICA	72
8.2	TORNILLOS DE BARRERA	73

8.3	SIMULACIÓN DE LA FUSIÓN EN LOS CABEZALES	74
8.4	MODELAMIENTO MATEMÁTICO DEL MODELO DE PRESIÓN	75
8.4.1	Flujo de Arrastre	76
8.4.2	Flujo de Presión	78
8.5	CALCULO DEL DIÁMETRO NOMINAL DEL TORNILLO EXTRUSOR	81
9	MODELO DE TEMPERATURA	84
10	METODOLOGÍA PARA EL CALCULO DE TORNILLOS EXTRUSORES	87
10.1	DESARROLLO DEL MODELO DE FUSIÓN UTILIZANDO EXCEL	91
10.2	DESARROLLO DEL MODELO DE PRESIÓN UTILIZANDO EXCEL	95
10.3	DESARROLLO DEL MODELO DE TEMPERATURA UTILIZANDO EXCEL	100
11	CONCLUSIONES	103
12	RECOMENDACIONES	104
	BIBLIOGRAFÍA	105
	ANEXOS	107

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Datos de entrada del tornillo	91
Tabla 2. Datos de entrada del proceso	91
Tabla 3. Datos de entrada del material	92
Tabla 4. Datos de salida del tornillo	92
Tabla 5. Velocidades de las interfases	92
Tabla 6. Datos de salida del proceso	93
Tabla 7. Datos de salida de fusión en la zona de alimentación	93
Tabla 8. Datos de salida de fusión en la zona de compresión	94
Tabla 9. Geometría del tornillo de barrera utilizado en los cálculos	95
Tabla 10. Datos del proceso	95
Tabla 11. Datos Experimentales	96
Tabla 12. Aumento de la presión en la zona de alimentación	96
Tabla 13. Aumento de la presión en la zona de compresión	97
Tabla 14. Aumento de la presión en la zona de dosificación	98
Tabla 15. Datos de entrada para el modelamiento de la temperatura	101
Tabla 16. Resultados Obtenidos	102

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Tipos de extrusoras	23
Figura 2. Cabezal para tubería y para películas sopladas	24
Figura 3. Enfriamiento por contacto con cilindros	25
Figura 4. Calibración de espesores en película soplada	25
Figura 5. Sistema de embobinado para películas	26
Figura 6. Componentes generales de una línea de extrusión	26
Figura 7. Principales aplicaciones del polietileno	28
Figura 8. Principales aplicaciones del polipropileno	28
Figura 9. Tipos de extrusoras	31
Figura 10. Componentes generales de una maquina extrusora	32
Figura 11. Diseños de tolvas de alimentación	33
Figura 12. Cabezal con torpedo	35
Figura 13. Plato rompedor	36
Figura 14. Extrusora monohusillo	37
Figura 15. Variables a considerar en los diseños de tornillos para maquinas monohusillo	41
Figura 16. Tipos de tornillos para maquinas monohusillo	43
Figura 17. Zonas en un tornillo extrusor	44

Figura 18.	Coeficiente de fricción vs. Temperatura	45
Figura 19.	Diagramas de las funciones de las zonas del tornillo extrusor	48
Figura 20.	Geometría de un tornillo extrusor	50
Figura 21.	Desarrollo de una espira del tornillo	51
Figura 22.	Comportamiento de la viscosidad con relación a la velocidad de corte	55
Figura 23.	Viscosidad en función de algunos polímeros	56
Figura 24.	Corte transversal mostrando como el ancho de la zona fundida aumenta en dirección del flujo	58
Figura 25.	Perfil de velocidades	59
Figura 26.	Sistemas de coordenadas en el canal del tornillo	61
Figura 27.	Representación esquemática del fenómeno de la fusión	62
Figura 28.	Vista transversal del canal mostrando las dos zonas	63
Figura 29.	Demostración de la fusión del polímero después de la tercera vuelta	64
Figura 30.	Perfil de velocidades para el flujo de arrastre	76
Figura 31.	Perfil de velocidades para el flujo de presión	78
Figura 32.	Triangulo del calculo de Δz	86
Figura 33.	Efectos de la presión en el cabezal	88
Figura 34.	Diagrama de flujo de la metodología de diseño	90

Figura 35.	Comportamiento de la fusión por medio de un modelo matemático	94
Figura 36.	Relación área Vs. presión	98
Figura 37.	Aumento de presión a medida que avanza por el tornillo	99
Figura 38.	Comportamiento de la Temperatura simulada	102

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo 1. Teorema de Stokes	107

GLOSARIO

CALANDRADO: Proceso continuo que requiere de la alimentación de un material polimérico gelificado y caliente que pasa por unos rodillos a temperaturas de calandra.

ISOTRÓPICO: Hecho de poseer las mismas propiedades en todas las direcciones.

NITRACIÓN: Proceso por el cual se le agrega ácido nítrico en un medio ácido (Por lo general ácido sulfúrico) una cadena molecular.

PIROXILINA: Es un barniz sintético de celulosa que se encuentra parcialmente nitrada.

POLIMERIZACIÓN: Es el proceso mediante el cual se forma un polímero a partir de monómeros. Se caracteriza porque la disposición de los átomos no cambia, y porque los átomos de partida hacen parte de los átomos del polímero final, no se producen moléculas finales. Existen tres procesos para obtener polímeros a parte de este, son la policondensación y la poliadición

VISCOSIDAD: Propiedad de fluidos para fluir a través de un canal, esta directamente relacionada con la temperatura.

RESUMEN

En la actualidad no es posible acceder fácilmente a literatura donde se enseñe de manera clara y precisa los métodos existentes que permitan calcular los perfiles de fusión, presión y temperatura necesarios para el diseño eficiente de un tornillo para extrusoras mono husillo, no obstante a esta limitación, existen intereses en superarlo y poner los resultados al alcance del gremio regional.

La economía colombiana ha sufrido un gran avance en comparación con otros años, una de las industrias que mas ha ayudado para este crecimiento es la industria plástica, las resinas plásticas de mayor uso son el polietileno y el polipropileno, en todas sus clasificaciones; en conjunto con los otros polímeros representan al rededor de 93 -94% del tonelaje de materias plásticas procesadas en Colombia.

El proceso de extrusión de polímeros es uno de los más importantes en la industria de transformación de plásticos. Según últimos estudios realizados por la industria polimérica, cerca del 60% del total de los polímeros transformados en Colombia, han pasado por algún proceso de extrusión.

El corazón principal de un maquina extrusora es el tornillo o husillo, el cual gira en el interior de un cilindro denominado barril y es capaz de fundir el material y general en el una presión a una velocidad dada, bajo ciertas restricciones de operación. Si el tornillo no es capaz de generar la presión suficiente que le imponen las restricciones al flujo, o si por el contrario genera una presión mucho más alta de la requerida, se pueden presentar problemas de calidad, reflejadas en desperdicio y reducciones de productividad. Un diseño adecuado del tornillo, subsana estas dificultades.

Existen dos modelos planteados que predicen de forma matemática los procesos de fusión y el aumento de la presión en el tornillo los cuales serán unos de los principales pilares de este trabajo; con el desarrollo de estos las empresas tendrán una valiosa herramienta para predecir y resolver los posibles problemas de operación.

INTRODUCCIÓN

La palabra PLÁSTICOS es una palabra que deriva del griego "Plastikos" que significa "Capaz de ser Moldeado", sin embargo, esta definición no es suficiente para describir de forma clara a la gran variedad de materiales que así se denominan. Técnicamente los polímeros son sustancias de origen orgánico formadas por largas cadenas macromoleculares que contienen en su estructura carbono e hidrógeno principalmente. Se obtienen mediante reacciones químicas entre diferentes materias primas de origen sintético o natural.

Los plásticos son parte de la gran familia de los polímeros, comúnmente se denomina plástico a toda sustancia con un comportamiento elástico, es de aclarar que el termino plástico difiere del termino polímero; se considera plástico al material terminado o procesado, es decir es la suma de polímeros mas algunos aditivos. Polímero, esta es una palabra de origen latín que significa Poli = Muchas y Meros = Partes. Hoy en día seria casi imposible imaginar que alguno de los sectores de nuestro contorno, de la economía o de la técnica, pudiera prescindir de los plásticos, sólo basta con observar nuestro alrededor y analizar cuántos objetos son de plástico para visualizar la importancia económica que tienen estos materiales.

El término polímero, en su significación mas general, se aplica a las sustancias de distintas estructuras y naturalezas que carecen de un punto fijo de ebullición y poseen durante un intervalo de temperaturas propiedades de elasticidad y flexibilidad que permiten moldearlas y adaptarlas a diferentes formas y aplicaciones.

En las últimas décadas es interesante y fenomenal la evolución de materiales poliméricos desarrollados debido a su gran adaptabilidad, durabilidad y precio; Casi todos los plásticos son extraídos en algún momento, desde que se obtienen en la planta química de polimerización hasta que experimentan el proceso de fabricación.¹

¹ ANGUITA DELGADO, Ramón. Extrusión de Plásticos: Teoría y equipos. Madrid: Hermann Blume, 1977. p. 13. ISBN 842141187

La economía colombiana ha sufrido un gran avance en comparación con otros años, una de las industrias que más ha ayudado para este crecimiento es la industria plástica.

La capacidad instalada total para la producción de resinas plásticas en Colombia, pasó de 826 mil en 2001 a 847 mil toneladas en 2002 y 2003. Las resinas plásticas de mayor uso en el país son los polietilenos (PE), incluidos los de baja densidad convencional y lineales, los de media y alta densidad y algunos tipos de metalocenos, los policloruros de vinilo (PVC) grado suspensión y emulsión, el homopolímero y los copolímeros de polipropileno (PP), los poliestirenos (PS) de propósito general y de alto impacto, y las resinas de polietilentereftalato (PET) para envases y láminas. Este conjunto representa alrededor del 93-94% del tonelaje de materias plásticas procesadas; algunos de estos materiales se fabrican localmente y otros son importados.²

La fabricación de husillos para maquinas extrusoras es un proceso que se adelanta empíricamente en la actualidad, esto ha conllevado que la mayoría de empresas de transformación de polímeros de nuestro país con maquinaria extranjera, dependan tecnológicamente de los fabricantes de tornillos y cabezales, debido a que en nuestro país no existe la tecnología suficiente para fabricar en optimas condiciones estos elementos. Sin embargo, si es posible realizar los cálculos para la óptima fabricación de tornillos extrusores y enviar esta información a los fabricantes, definiendo en un plano adecuado las especificaciones de diseño, ayudaría en un alto porcentaje a disminuir la dependencia extranjera de nuestro país en este campo. Como uno de los propósitos fundamentales de esta tesis se tiene la idea de ayudar a los proyectistas de maquinas, con una metodología que los oriente en este procedimiento.

² ACOPLASTICOS. Plásticos en Colombia 2002 - 2003. En: Revista Acoplásticos. Vol. 2, No 1 (Feb. 2002); p. 6.

1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar una metodología para el diseño de tornillos para maquinas extrusoras mono husillo, aplicable a la transformación de poliolefinas y policloruro de vinilo.

1.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Enunciar el estado del arte referente a los diferentes modelos matemáticos existentes para el cálculo del perfil de fusión, presión y temperatura dentro el proceso.
- Reconocer un modelo matemático que permita calcular el perfil de fusión en el tornillo extrusor, superando las restricciones impuestas por el material polimérico al interior del cabezal.
- Reconocer un modelo matemático que permita calcular el perfil de presión en el tornillo extrusor, superando las restricciones impuestas por el material polimérico al interior del cabezal.
- Reconocer un modelo matemático que permita calcular el perfil de temperatura en el tornillo extrusor, superando las restricciones impuestas por el material polimérico al interior del cabezal.
- Aplicar los resultados obtenidos en nuestro modelo matemático al cálculo de un perfil de fusión, presión y temperatura, en el husillo, utilizando nuestro planteamiento metodológico de diseño.

2 MARCO TEÓRICO

El estudio del comportamiento que siguen los materiales poliméricos dentro del tornillo extrusor es un tema no muy abarcado a través de la historia, pero aun así existen numerosos autores que se han interesado por el tema y han planteado diferentes modelos. Estos serán nuestros puntos de partida para realizar una buena metodología con unas bases sólidas.

A través de la historia algunos autores han realizado ciertos aportes los cuales han sido los puntos de inicio para sus sucesores en la siguiente generación. De acuerdo a lo investigado, en el año 1959 Maddock's inicio algunos experimentos y estudios, seguido en 1966 por Tadmor el cual propuso, planteo y dio solución a las ecuaciones constitutivas, que describen el modelo de fusión del material polimérico en canal desarrollado del tornillo extrusor.

En 1971 Vermeulen planteo un modelo donde analizaba las ratas de fusión de los materiales poliméricos, en ese mismo año Donovan estudio la aceleración térmica. En 1975 Edmonson dio inicio al estudio sobre los perfiles de presión. Después de diez años aparece Pearson, quien retomo la teoría de Tadmor en 1966 y realizo una investigación en la cual tomando como base las ecuaciones constitutivas del modelo de Tadmor analizo las cinco zonas del modelo.

En 1984 Lindt observo la rigidez y la deformación que le ocurría al solidó al ser sometido a diferentes temperaturas, desde 1900 al 2002 diferentes autores como Lee, Rauwendaal, Noriega se han dedicado a comprobar las diferentes teorías planteadas por Tadmor y seguidas por Pearson.

3 PROCESO DE EXTRUSIÓN

La extrusión es un proceso utilizado a escala mundial desde inicios del siglo XIX para la fabricación de tuberías de plomo, según el primer modelo industrial del que se encuentra evidencia, fabricado por J. Bramah en 1795; no obstante hay información de este arte tan antiguo sin comienzos no muy conocidos también fue útil para procesar productos cerámicos, pastas alimenticias, barras de hielo, electrodos de carbono, minas de grafito para lápices, vidrios, y otros materiales.

La palabra “extrusión” viene de los vocablos latinos “ex” y “trudere”, que significan, fuerza y empujar. La extrusión podría definirse como:

“El proceso de obtención de longitudes ilimitadas con una sección transversal constante, conformando el material al obligarlo a pasar a través de una boquilla bajo condiciones controladas de temperatura y presión, como lo son cintas, planchas, barras, películas, tubos, perfiles, etc.”³

La materia prima utilizada en el proceso de extrusión de plásticos son los polímeros, el primer polímero se origina como resultado de un concurso realizado en 1860, cuando el fabricante estadounidense de bolas de billar Phelan and Collander ofreció una recompensa de 10.000 dólares a quien consiguiera un sustituto aceptable del marfil natural, destinado a la fabricación de bolas de billar. Una de las personas que compitieron fue el inventor norteamericano Wesley Hyatt, quien desarrolló un método de procesamiento a presión de la piroxilina, un nitrato de celulosa de baja nitración tratado previamente con alcanfor y una cantidad mínima de disolvente de alcohol, Los resultados alcanzados por los primeros plásticos incentivaron a los químicos y a la industria a buscar otras moléculas sencillas que pudieran enlazarse para crear polímeros. En la década del 30, químicos ingleses descubrieron que el gas etileno polimerizaba bajo la acción del calor y la presión, formando un termoplástico al que llamaron polietileno (PE), hacia los años 50 aparece el polipropileno (PP), al reemplazar en el etileno un átomo de hidrógeno por uno de cloruro se produjo el cloruro de polivinilo (PVC),

³ VERA MONDRAGÓN, Bairo. Diseño y construcción de una Extrusora de laboratorio. Santiago de Cali, 1996. p. 1. Trabajo de grado (Ingeniero Mecánico). Universidad Autónoma de Occidente. Facultad de Ingenierías.

un plástico duro y resistente al fuego, especialmente adecuado para cañerías de todo tipo.

Al agregarles diversos aditivos se logra un material más blando, sustitutivo del caucho, comúnmente usado para ropa impermeable, manteles, cortinas y juguetes. Un plástico parecido al PVC es el politetrafluoretileno (PTFE), conocido popularmente como teflón y usado para rodillos y sartenes antiadherentes, otro de los plásticos desarrollados en los años 30 en Alemania fue el poliestireno (PS), un material muy transparente comúnmente utilizado para vasos, divisiones, pots y hueveras. El poliestireno expandido (EPS), una espuma blanca y rígida, es usado básicamente para embalaje y aislante térmico.

En el proceso de extrusión la materia prima viene en varias formas dependiendo principalmente de la utilización y el diseño de la extrusora, hoy en día los polímeros vienen principalmente en forma de *pellets* los cuales son pequeños, sólidos y cortos cilindros que vienen de un proceso anterior conocido como peletizado el cual permite el fácil acceso del material desde la tolva al husillo.

El proceso de extrusión es conformado por dos etapas principales: el transporte del material hacia la boquilla y la conformación del material al pasar por la boquilla, después de estar en un estado de fusión. Es un proceso continuo, en que la resina es fundida por la acción de temperatura y fricción, es forzada a pasar por un dado que proporciona una forma definida, y enfriada finalmente para evitar deformaciones permanentes. El proceso de extrusión se ha especializado por la industria para la conformación de materiales termoplásticos, estos son un tipo de materiales poliméricos que se pueden ablandar o fundir varias veces sin variar apreciablemente su comportamiento químico, aunque también se extruyen los polímeros termofijos o termorígidos, estos después de ser procesados no son deformables, no se funden al calentarlos y si se calientan se descomponen.

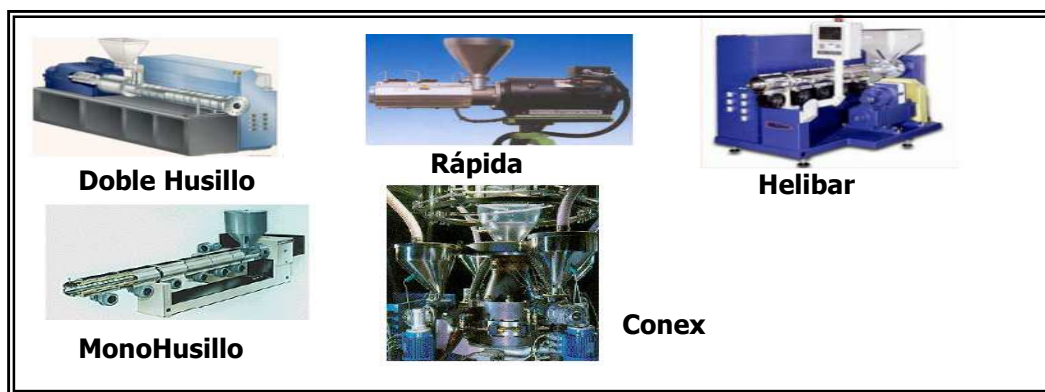
En este desarrollo para la metodología nos situaremos dentro del campo de las poliolefinas; el polietileno y el polipropileno, debido a que son los principales polímeros procesados en nuestro país. El proceso de extrusión es un proceso continuo, uno de sus objetivos principales es estandarizar las variables que lo afectan, tales como la presión, temperatura y la velocidad del husillo. La calidad del producto depende del comportamiento del polímero a través de tiempo y del paso del estado sólido a un estado de fusión. El proceso de extrusión presenta una alta productividad y es el proceso más importante de obtención de formas plásticas en volumen de producción. Su operación es de las más sencillas, ya que

una vez establecidas las condiciones de operación, la producción continúa sin problemas siempre y cuando no exista un disturbio mayor. El costo de la maquinaria de extrusión es moderado, en comparación con otros procesos como inyección, soplado o Calandrado, y con una buena flexibilidad para cambios de productos sin necesidad de hacer inversiones mayores. Pero como todo proceso tiene sus desventajas, la restricción principal es que los productos obtenidos por extrusión deben tener una sección transversal constante en cualquier punto de su longitud (tubo, lámina) o periódica (tubería corrugada); quedan excluidos todos aquellos con formas irregulares o no uniformes. La mayor parte de los productos obtenidos de una línea de extrusión requieren de procesos posteriores con el fin de habilitar adecuadamente el artículo. Toda línea de extrusión consta de cuatro elementos principales:

3.1 LA MAQUINA EXTRUSORA

Es el primer elemento de cualquier línea de extrusión. Cuando un material termoplástico alimenta al extrusor, el husillo o tornillo lo empuja hacia delante a lo largo del barril o cilindro, donde se calienta y se transforma en fluido. Este fluido continúa y al final se le hace pasar a través de un dado, este fluido debe ser enfriado rápidamente para mantener la forma deseada. En el próximo capítulo de este trabajo ampliaremos en el estudio de las maquinas extrusoras monohusillo.

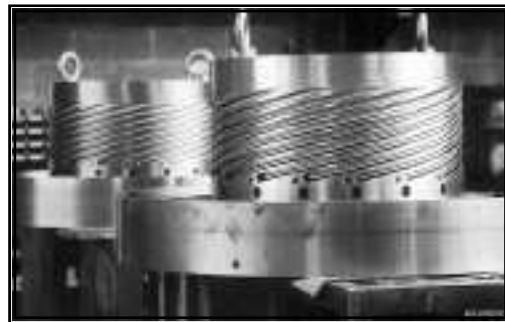
Figura 1. Tipos de Extrusoras



3.2 LA MATRIZ DE EXTRUSIÓN Ó CABEZAL

El elemento primario de la línea de extrusión, la extrusora, genera un perfil comúnmente con una forma circular. La matriz de extrusión popularmente llamado cabezal tiene como función objetivo darle una nueva forma al flujo entregado por la extrusora. La geometría del perfil depende del tipo de cabezal instalado, por ejemplo, los cabezales angulares se usan para las películas sopladas y caños; los cabezales rectangulares para películas y laminas lisas; los cabezales con formas irregulares para perfiles.

Figura 2. Cabezal para tubería y para películas sopladas

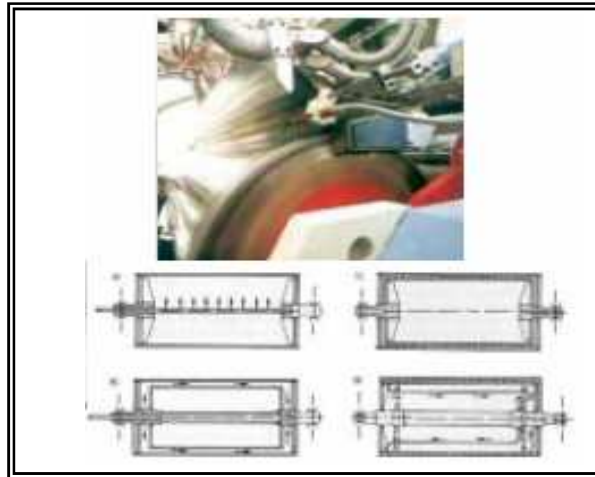


3.3 UNIDAD DE CALIBRACIÓN Y ENFRIAMIENTO

El perfil fundido que sale del orificio del cabezal o boquilla ya posee una forma similar al producto final. No obstante, en algunos casos los espesores de paredes más grandes y formas difíciles de mantener, tales como cables, caños y perfiles, es necesario sumergir el producto en una cámara de pre-enfriamiento, la cual por el contacto directo con discos o paredes metálicas de enfriamiento por agua permite la creación de una película sólida suficientemente fuerte como para aplicar las fuerzas de tracción necesarias y fijar la forma final. Sin embargo, los efectos de reducción de las fuerzas de tracción, en combinación con los efectos de contracción del enfriamiento, resultan en una reducción mayor del espesor de las paredes, aun después de alcanzar el estado sólido.

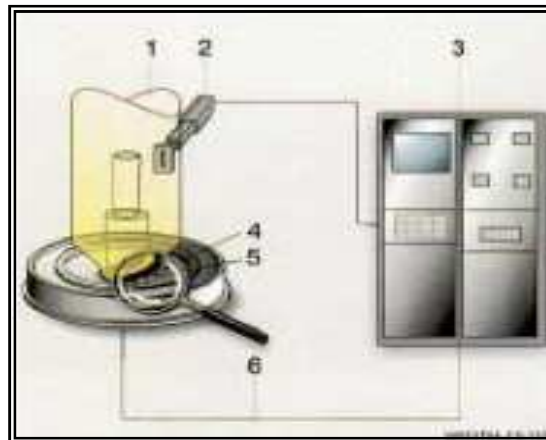
En casos menos críticos, la red fundida se puede enfriar con aire o en el contacto con rodillos de enfriamiento.

Figura 3. Enfriamiento por contacto con cilindros



Es necesaria en toda línea de extrusión la utilización de elementos de calibración los cuales garantizaran obtener un producto con las especificaciones requeridas.

Figura 4. Calibración de Espesores en Película Soplada



3.4 UNIDAD DE TRACCIÓN Ó BOBINADO

A través de rodillos que giran a una velocidad adecuada para el producto final, se logra bajar un poco la temperatura del producto pre-enfriado y moldeado; ya sea por el contacto con el ambiente, por una cámara de aire, o por un baño de agua para así alcanzar una temperatura cercana a la ambiente.

Según la geometría final y el espesor de las paredes, los productos pueden ser bobinados en carretes mas grandes; como es el caso de películas, cables o fibras, o cortados en largos discretos; láminas, caños, perfiles.

Figura 5. Sistema de Embobinado para películas

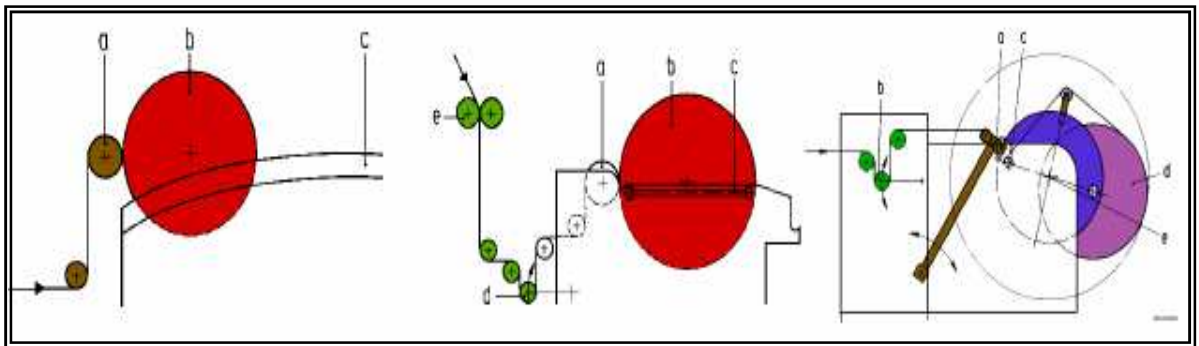
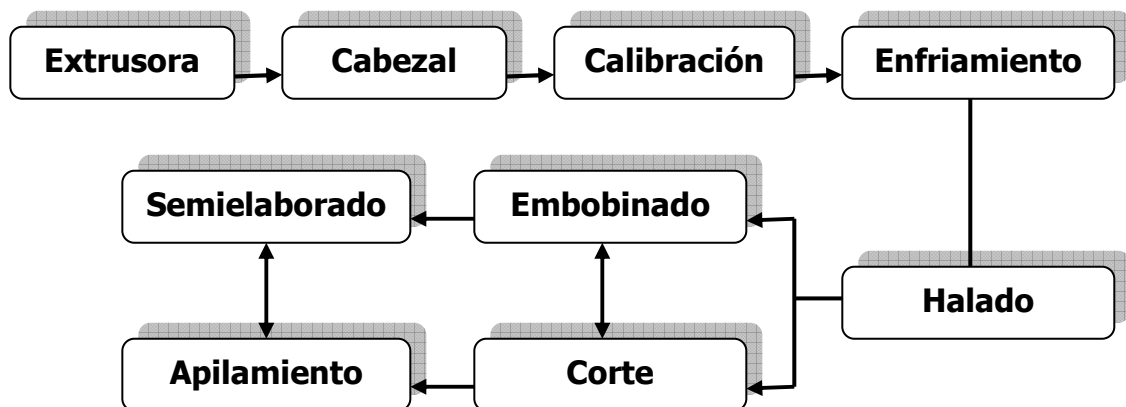


Figura 6. Componentes generales de una línea de Extrusión



Fuente: Autor

3.5 PRINCIPALES APLICACIONES DE LAS POLIOLEFINAS EN LA EXTRUSIÓN

La extrusión se ha usado industrialmente durante los últimos 50 años, la variedad de productos obtenidos a partir del proceso de extrusión va desde la fabricación de delgados hilos, hasta la de una ancha y gruesa película.

Las aplicaciones actuales de la extrusión son las siguientes:

- Bolsas plásticas
- Película plástica usos diversos
- Película para cultivos
- Bolsa para envase de alimentos
- Tubería para agua y drenaje
- Mangueras para jardín
- Mangueras uso médico
- Recubrimiento de alambres
- Recubrimiento de Perfiles
- Hojas para persiana
- Ventanería
- Canales de flujo de Agua
- Lámina y Película Plana
- Rafia
- Mantales
- Cinta Adhesiva
- Flejes para embalaje
- Monofilamentos
- Filamentos
- Alfombra (Filamento de las alfombras)

El polietileno (PE) es un termoplástico fabricado a partir del Etileno, elaborado a partir del etano, uno de los componentes del gas natural. Se comercializa generalmente en dos tipos: el polietileno de baja (PEBD) y el de alta densidad (PEAD).

En la numeración estandarizada para el reciclaje de estos dos productos corresponden a los números 4 y 2 respectivamente.

El polietileno es muy versátil y se lo puede transformar de diversas formas incluyendo la extrusión. Sus usos y aplicaciones van desde envases para detergentes, aceites automotor, shampoo, lácteos; bolsas para supermercados, cajones, tambores, caños para gas, telefonía, agua potable, minería, drenaje y uso sanitario, bolsas tejidas.

Sus principales ventajas son la resistencia a las bajas temperaturas, bajo peso molecular, su no toxicidad entre otros.

Figura 7. Principales Aplicaciones del Polietileno



El polipropileno (PP) es un termoplástico que se obtiene por polimerización del propileno. Los copolímeros se forman agregando Etileno durante el proceso. El PP es el termoplástico de más baja densidad. Es un plástico de elevada rigidez, alta cristalinidad, elevado punto de fusión y excelente resistencia química. Al adicionarle distintas cargas (talco, caucho, fibra de vidrio, etc.) se potencian sus propiedades hasta transformarlo en un polímero de ingeniería. El PP es transformado en la industria por los procesos de inyección, soplado, extrusión y termoformado. Sus usos varían entre la fabricación para película para alimentos, bolsas de rafia tejidas, envases industriales (Big Bag), hilos, tapas en general, envases, telas no tejidas. Sus principales ventajas son la resistencia a la temperatura (hasta 135°C), es un elemento de buena barrera, alta impermeabilidad, excelente brillo, liviano. En la numeración estandarizada el polipropileno (PP) se denota con el numero 6. En la actualidad nuestro país esta en el proceso de regirse por esta norma con el fin de mejorar las condiciones para el reciclado de materiales plásticos; Los productos fabricados en el exterior deben poseer esta nomenclatura en alguna parte visible del producto.

Figura 8. Principales Aplicaciones del Polipropileno



4 EXTRUSORA

En toda línea de extrusión el elemento primario y predominante es la extrusora, este es el punto de partida para cualquier proceso de extrusión; este debe cumplir con tres principales requerimientos:

- Transportar continuamente la materia prima de un estado sólido a llevarlo a ser un fundido del material.
- A medida que es transportado por medio del tornillo extrusor, el material debe irse fundiendo continuamente.
- La materia prima debe ser homogenizada tanto térmica como físicamente.

Básicamente, una extrusora consta de un eje metálico central con álabes o espiras helicoidales llamado husillo o tornillo, instalado dentro de un cilindro metálico revestido con una camisa de resistencias eléctricas. En un extremo del cilindro se encuentra un orificio de entrada para la materia prima, donde se instala una tolva de alimentación, generalmente de forma cónica; en ese mismo extremo se encuentra el sistema de accionamiento del husillo, compuesto por un motor y un sistema de reducción de velocidad. En la punta del tornillo, se ubica la salida del material y el dado que forma finalmente el semielaborado. Las funciones de un equipo de extrusión son principalmente las siguientes:

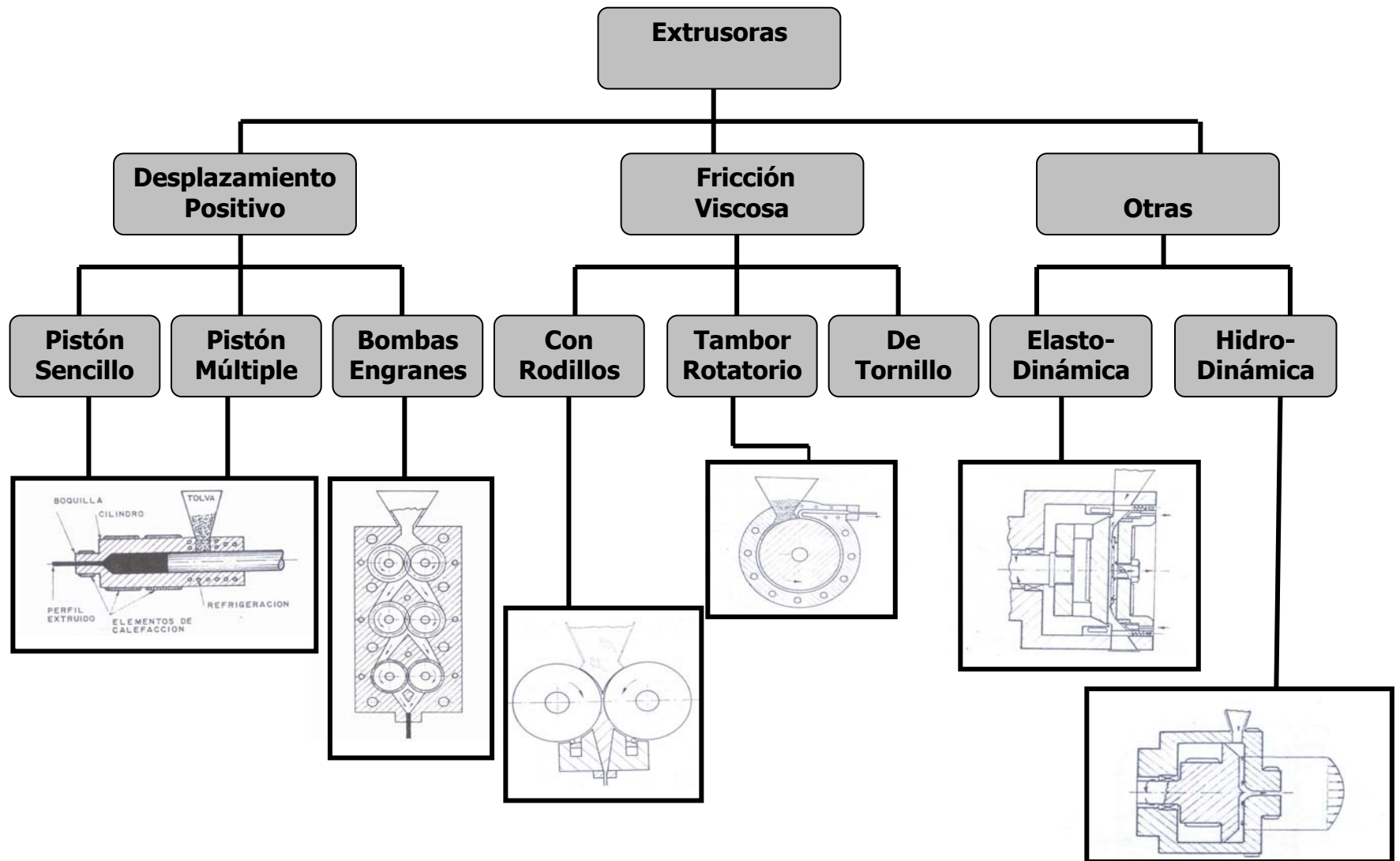
- Recibir y almacenar el polímero
- Transportar el material sólido
- Calentar y comprimir
- Plastificar
- Homogenizar
- Construir presión
- Extruir el semielaborado

4.1 TIPOS DE EXTRUSORAS

En todo proceso de extrusión se le debe suministrar una presión suficiente al material fundido para hacerlo pasar por la boquilla, este es el principio fundamental, los tipos de extrusoras han ido evolucionando a través del tiempo empezado con ***extrusoras de desplazamiento positivo*** en las cuales la acción del transporte era efectuado ya sea por un *sistema de pistones* donde la presión era suministrada por energía mecánica o hidráulica, o por un sistema de *bombas de engranajes*, estas obligaban a pasar una solución viscosa de baja viscosidad a través de hileras para la obtención de fibras artificiales y monofilamentos. Las desventajas de los anteriores sistemas nombrados eran que el proceso se volvía fundamentalmente discontinuo y que el poco suministro de calor podría generar esfuerzos de corte en el seno del material respectivamente, además la generación de calor por disipación viscosa, hacia de esta opción altamente costosa; ya que se dependía del consumo de energía eléctrica como medio principal de generación de calor para derretir el polímero.

En otra categoría se encuentran ***las extrusoras de fricción viscosa***, en estas la acción del transporte se consigue aprovechando las propiedades físicas del polímero y la fricción generada entre este y las paredes de la maquina. En estas extrusoras se genera un trabajo mecánico sobre el polímero debido a los esfuerzos de cizallamiento que se provocan en el material pastoso y de elevada viscosidad, transformándose en calor por la fricción en el seno del propio polímero. Se encuentran en esta categoría *las extrusoras de rodillo*, utilizadas en la transformación de cauchos en la actualidad, sencillamente son dos rodillos en juego los cuales tienen adaptado una caja donde la salida es la boquilla, estos son alimentados desde la parte superior. Las *extrusoras de tambor rotatorio* consiste fundamentalmente en un tambor que rota donde este esta rodeado por una carcasa inmóvil que es calentada o enfriada para controlar la temperatura, entre el tambor y el cuerpo queda una pequeña holgura en la cual el polímero fluye. Igualmente se encuentran componiendo esta categoría las ***Extrusoras de Tornillo*** pero estas las trataremos ampliadamente mas adelante.

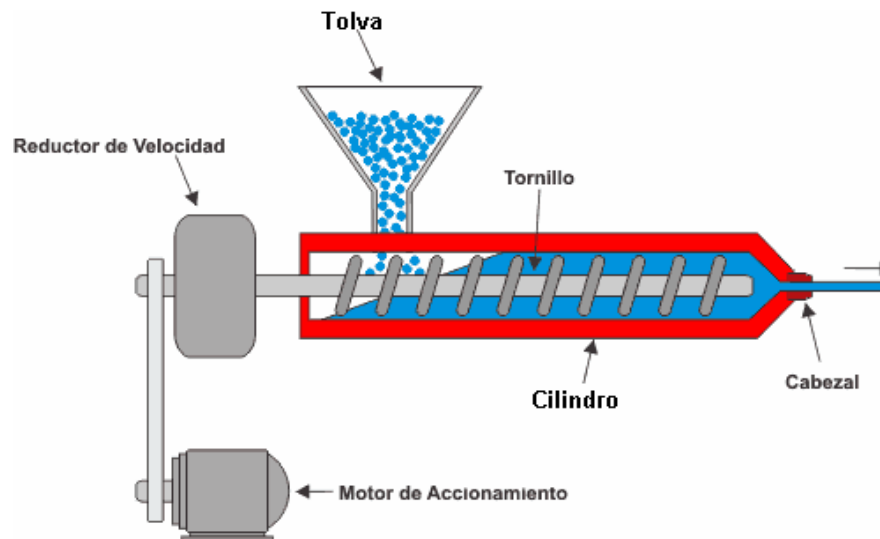
Figura 9. Tipos de Extrusoras



4.2 ELEMENTOS CONSTITUYENTES DE UNA MAQUINA DE EXTRUSIÓN

Toda maquina de extrusión se compone principalmente de cinco partes esenciales: tolva, cilindro, sistema motriz, cabezal, tornillo. Este ultimo entraremos a estudiar en el capitulo siguiente.

Figura 10. Componentes Generales de una Maquina Extrusora



4.2.1 Tolva Alimentadora. La tolva es el depósito de materia prima en donde se colocan los *pellets* de material plástico para la alimentación continua del extrusor.

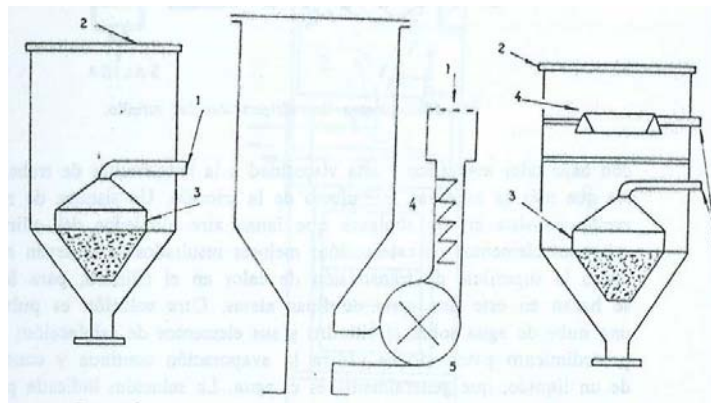
Debe tener dimensiones adecuadas para ser completamente funcional; los diseños mal planeados, principalmente en los ángulos de bajada de material, pueden provocar estancamientos de material y paros en la producción.

En materiales que se compactan fácilmente, una tolva con sistema vibratorio puede resolver el problema, rompiendo los puentes de material formados y permitiendo la caída del material a la garganta de alimentación. Si el material a procesar es problemático aún con la tolva en vibración, la tolva tipo *cramer* es la única que puede formar el material a fluir, empleando un tornillo para lograr la alimentación.

Las tolvas de secado son usadas para eliminar la humedad del material que está siendo procesado, sustituyen a equipos de secado independientes de la máquina.

En sistemas de extrusión con mayor grado de automatización, se cuenta con sistemas de transporte de material desde contenedores hasta la tolva, por medios neumáticos o mecánicos. Otros equipos auxiliares son los dosificadores de aditivos a la tolva y los imanes o magnetos para la obstrucción del paso de materiales ferrosos, que puedan dañar el husillo y otras partes internas del extrusor. La entrada después de la tolva abarca una longitud de tornillo por lo menos igual a un diámetro de este, su sección transversal puede ser circular o rectangular.

Figura 11. Diseños de tolvas de alimentación



4.2.2 Cilindro, Barril o Cuerpo de la Máquina. Es un cilindro metálico que aloja al husillo, el barril debe tener una compatibilidad y resistencia al material que esté procesando, es decir, ser de un metal con la dureza necesaria para reducir al mínimo cualquier desgaste. La dureza del barril se consigue utilizando aceros de diferentes tipos y cuando es necesario se aplican métodos de endurecimiento superficial de las paredes internas del cilindro, que son las que están expuestas a los efectos de la abrasión y la corrosión durante la operación del equipo.

Esta parte junto con el tornillo extrusor proveen la fricción necesaria para que con el paso del tiempo el material polimérico vaya siendo fundido uniformemente. El cilindro cuenta con resistencias eléctricas que proporcionan una parte de la energía térmica que el material requiere para ser fundido. El sistema de resistencias, en algunos casos va complementado con un sistema de enfriamiento que puede ser un flujo de líquido o por ventiladores de aire. Todo el sistema de calentamiento es controlado desde un tablero, donde las temperaturas de proceso se establecen en función del tipo de material y del producto deseado.

Para la mejor conservación de la temperatura a lo largo del cilindro y prevenir cambios en la calidad de la producción por variaciones en la temperatura ambiente, se acostumbra aislar el cuerpo del cilindro con algún material de baja conductividad térmica como la fibra de vidrio o el fieltro.

La experiencia ha demostrado que el cilindro debe poseer una longitud alta para así con esta distancia se pueda alcanzar a fundir totalmente el material con el del tiempo. Esta longitud esta definida por la relación entre L/D entre 20 y 24, para poliolefinas, para relaciones mayores a 24 se presentan problema ingenieriles de construcción debido a la torsión del tornillo cuando gira a grandes velocidades (rpm), sin embargo las maquinas adiabáticas requieren de este tipo de tornillo, para lograr un aporte de calor significativo por generación viscosa lograda en el tornillo. La longitud del cilindro se mide desde el plato rompedor hasta la parte posterior de la garganta de alimentación, su diámetro considerado es el diámetro interno.

Debido a la fricción generada entre el cilindro y el tornillo estos dos elementos deben ser contruidos con materiales con propiedades mecánicas buenas, y una alta resistencia al desgaste, las propiedades exigidas hoy en día para que los cilindros tengan una alta vida útil serian:

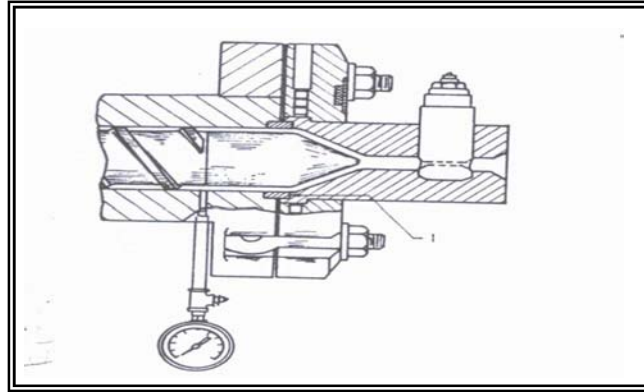
- Resistencia al desgaste.
- Alta resistencia a la abrasión.
- Buena resistencia química en contacto con los polímeros fundidos.
- Elevada dureza incluso a altas temperaturas.

4.2.3 Cabezal. Las boquillas y el plato rompedor son componentes funcionales del cabezal, es una de las partes móviles de la maquina ya que se remueve con gran facilidad ya sea para cambiar el tipo de producción a extruir o para cambiar o reparar el plato rompedor.

El diseño interno del cabezal debe permitir lo mas fácilmente posible el paso del fundido hacia la boquilla, lo mas aconsejable es evitar perfiles con un ángulo excesivamente convergente, como regla general, cuanto mayor es la viscosidad del termoplástico fundido más agudo debe ser el ángulo del perfil para adaptarlo a las

líneas de flujo del material⁴. En algunos casos el plato rompedor es remplazado por una prolongación del tornillo para así evitar las zonas muertas en el cabezal.

Figura 12. Cabezal con torpedo



Fuente: ANGUITA DELGADO, Ramón. Extrusión de Plásticos: Teoría y equipos. Madrid: Hermann Blume, 1977. p. 49. ISBN 842141187

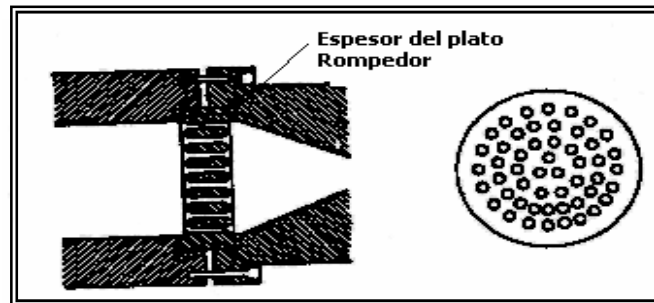
4.2.3.1 Boquilla. Es la pieza fundamental del cabezal, sirve para dar la conformación final del material plástico al perfil deseado, debe estar proyectada de manera que permita a la masa plástica estar en una zona de reposo para así poder conformar el perfil deseado. A través de la boquilla fluye el material fundido, el polímero, sumamente viscoso y de características no-newtonianas, por lo que la relación entre la viscosidad y la velocidad de cizalladura no es lineal.

4.2.3.2 Plato Rompedor. Está ubicado en el final del cilindro, debe tener un ancho suficiente para evitar el contacto entre el cilindro y el cabezal, pero igual su ajuste debe evitar la salida de material. Está constituido por un anillo robusto de acero generalmente que rodea a un grueso plato del mismo material, este va taladrado con un número variable de agujeros dependiendo del uso, el diámetro de los agujeros varía entre 3 a 5 mm⁵. Muchas veces la cara del plato rompedor que mira al tornillo lleva un chaflán que permite el ajuste y así evitar las zonas muertas para el material. Su función es romper las líneas de flujo provenientes del tornillo, estas tienden a girar en el mismo sentido del tornillo, y convertirlas en unas líneas de flujo que corren paralelas entre si. El plato rompedor cumple varias funciones, ayuda a aumentar la presión, el flujo rotacional del plástico fundido,

⁴ ANGUITA DELGADO, Op. cit., p. 29.

procedente de la zona de dosificación del tornillo, es transformado en flujo lineal, paralelo al eje del tornillo, detiene muchas impurezas y material no plastificado⁶.

Figura 13. Plato rompedor



Fuente: RAMOS, Luis. Extrusión de Plásticos: Principios básicos. Saltillo: Limusa Noriega Editores, 2000. p. 46. ISBN 9681845048

4.3 EXTRUSORAS DE TORNILLO

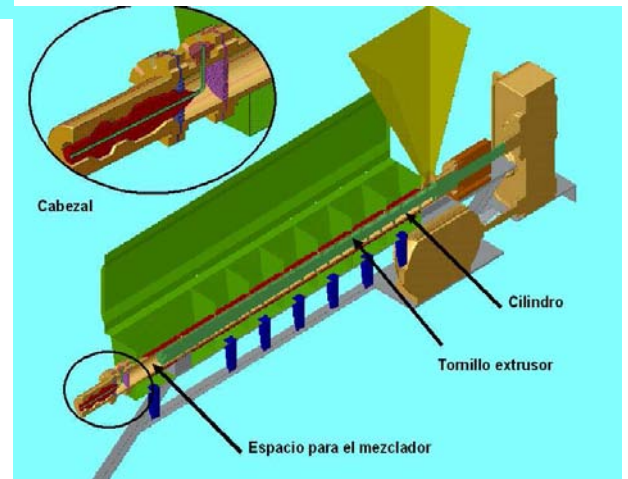
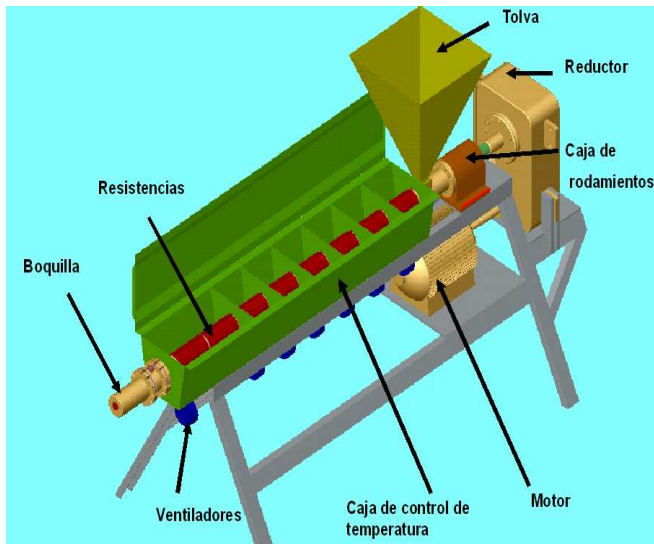
En la actualidad la extrusoras de tornillo son prácticamente la únicas utilizadas en la transformación de termoplásticos, están compuestas por uno o dos husillos dependiendo del la función a realizar. Este tipo de extrusora ha sido la puerta de entrada para todos los tipos de estudio sobre el comportamiento del polímero a través del tiempo y de diferentes variables que lo afectan.

El componente principal de la extrusora de tornillo es como su propio nombre lo dice, es el tornillo o husillo. Con este elemento el polímero utilizado puede fundirse a través del paso del tiempo y de la distancia de este. El diseño del tornillo depende específicamente del material a trabajar ya que las propiedades tanto físicas como químicas de este no permiten tener un tornillo estándar.

⁵ Ibíd., p. 29.

⁶ RAMOS, Luis. Extrusión de Plásticos: Principios básicos. Saltillo: Limusa Noriega Editores, 2000. p. 48. ISBN 9681845048

Figura 14. Extrusoras monohusillo



Fuente: Realizada por el Ing. Juan Carlos Otero

5 TORNILLO EXTRUSOR PARA MAQUINAS MONOHUSILLO

5.1 DEFINICIÓN DE TORNILLO

Gracias a los intensos estudios del comportamiento del flujo de los polímeros, el husillo o tornillo ha evolucionado ampliamente desde el auge de la industrial plástica hasta el grado de convertirse en la parte que contiene la mayor tecnología dentro de una máquina de extrusión. Por esto, es la pieza que en alto grado determina el éxito de una operación de extrusión.

Cabe mencionar que cuando se comienza la construcción de una maquina extrusora, debe identificarse el tipo de material a procesar para poder hacer un diseño óptimo del tornillo extrusor.

Para esta metodología, desarrollaremos los diseños, basándonos en las características de las poliolefinas como el polietileno y polipropileno. Mediante técnicas como la espectroscopia de infrarrojo o la calorimetría diferencial, podemos identificar estos materiales y obtener información valiosa como lo es su punto de fusión al analizar el intervalo de temperatura de fusión:

- | | |
|--|--------------|
| • Polietileno (dependiendo de la densidad) | 105 – 135° C |
| • Polipropileno | 160 – 170° C |

Una primera orientación de que hay poliolefinas se puede obtener midiendo la densidad. Al contrario de lo que ocurre con otros materiales plásticos, las poliolefinas flotan en el agua. Se puede diferenciar el polietileno del polipropileno arañando una muestra con la uña del dedo; mientras que en el polietileno se forman marcas, y el polipropileno es resistente al rayado. Existen otros métodos para la identificación de los materiales, como son las pruebas de rigidez, transparencia, tacto, dureza superficial, sonido, y combustión; esta última la de mayor grado de veracidad. El polietileno y el polipropileno al ser sometidos al calor presentan un comportamiento similar al de una vela, en el área de contacto con el fuego se genera una lamina transparente, presentan un olor a parafina; se

diferencia uno del otro observando que el polietileno no gotea, y el polipropileno si.

La configuración geométrica del tornillo, como se muestra en la figura 15, depende fundamentalmente del material a transformar, es necesario tener en cuenta cada una de las variables que componen el tornillo extrusor:

- **Alabes o filetes:** Los alabes o filetes, que recorren el husillo de un extremo al otro, son los verdaderos impulsores del material a través del extrusor. Las dimensiones y formas que éstos tengan, determinará el tipo de material que se pueda procesar y la calidad de mezclado de la masa al salir del equipo.
- **Profundidad del filete en la zona de alimentación:** Es la distancia entre el extremo del filete y la parte central o raíz del husillo. En esta parte, los filetes son muy pronunciados con el objeto de transportar una gran cantidad de material al interior del extrusor, aceptado el material sin fundir y aire que está atrapado entre el material sólido.
- **Profundidad del filete en la zona de dosificación:** En la mayoría de los casos, es muchos menor a la profundidad de filete en la alimentación. Ellos tienen como consecuencia la reducción del volumen en que el material es transportado, ejerciendo una compresión sobre el material plástico. Esta compresión es útil para mejorar el mezclado del material y para la expulsión del aire que entra junto con la materia prima alimentada.
- **Relación de compresión:** Como las profundidades de los alabes no son constantes, las diferencias se diseñan dependiendo del tipo de material a procesar, ya que los plásticos tienen comportamiento distintos al fluir. La relación entre la profundidad del filete en la alimentación y la profundidad del filete en la descarga, se denomina relación de compresión. El resultado de este cociente es siempre mayor a uno y puede llegar incluso hasta 4.5 en algunos materiales.

- **Longitud:** Tiene una importancia especial; influye en el desempeño productivo de la máquina y en el costo de ésta. Funcionalmente, al aumentar la longitud del husillo y consecuentemente la del extrusor, también aumenta la capacidad de plastificación y la productividad de la máquina. Esto significa que operando dos extrusores en las mismas condiciones de velocidad y temperatura que sólo se distingan en longitud, uno no tendrá capacidad de fundir o plastificar el material después de recorrer todo el extrusor, mientras que el extrusor de mayor longitud ocupará la longitud adicional para continuar la plastificación y dosificará el material perfectamente fundido, en condiciones para fluir por el dado.

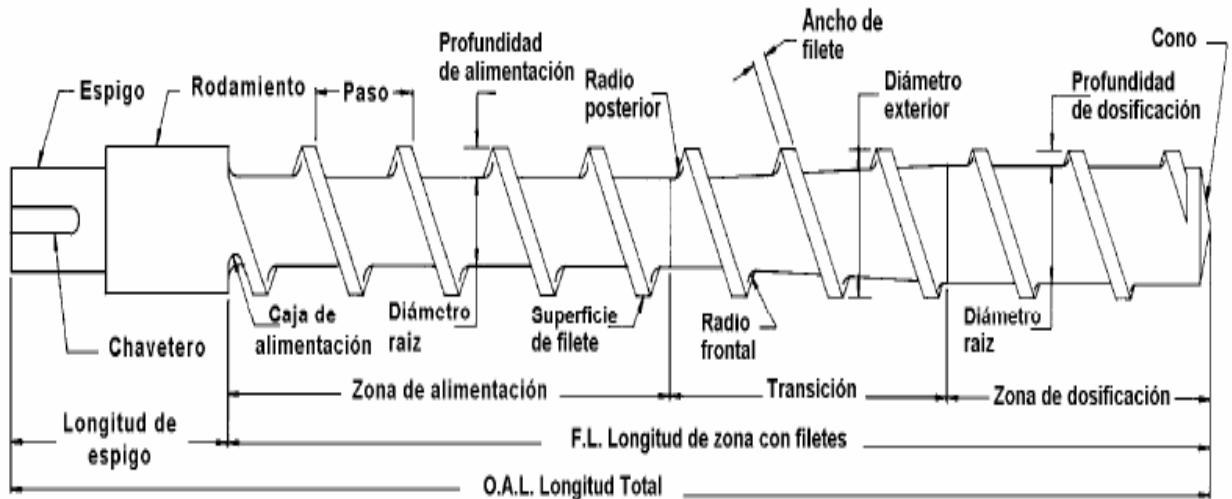
Otro aspecto que se mejora al incrementar la longitud es la calidad de mezclado y homogeneización del material. De esta forma, en un extrusor pequeño la longitud es suficiente para fundir el material al llegar al final del mismo y el plástico se dosifica mal mezclado.

En las mismas condiciones, un extrusor mayor fundirá el material antes de llegar al final y en el espacio sobrante seguirá mezclando hasta entregarlo homogéneo. Esto es importante cuando se procesan materiales pigmentados o con lotes maestros (*master batch*), de cargas o aditivos que requieran incorporarse perfectamente en el producto.

- **Diámetro:** Es la dimensión que influye directamente en la capacidad de producción de la máquina generalmente crece en proporción con la longitud del equipo. A diámetros mayores, la capacidad en kg/hr es presumiblemente superior. Al incrementar esta dimensión debe hacerlo también la longitud de husillo, ya que el aumento de la productividad debe ser apoyada por una mejor capacidad de plastificación.

Como consecuencia de la importancia que tienen la longitud y el diámetro del equipo, y con base en la estrecha relación que guardan entre sí, se acostumbra especificar las dimensiones principales del husillo como una relación longitud / diámetro (L/D).

Figura 15: Variables a considerar en los diseños de Tornillos para Maquinas Extrusoras



SP 180821.PCI-03/20

Fuente: ESTRADA, Omar. Exposición extrusión monohusillo y doblehusillo. Medellín: ICIPC, 2002. p 22.

5.2 FUNCIONES DE UN TORNILLO EXTRUSOR

El objetivo de un husillo es proveer una buena calidad, una masa fundida homogénea, una temperatura y productividad constantes. Los husillos demasiado largos tienen la dificultad de no mantener una temperatura de masa fundida lo suficientemente controlada. En un buen diseño se requieren husillos capaces de producir una fusión de polímero rápida y una reducción de la temperatura de la masa por efecto de la reducción viscosa.

5.3 TIPOS DE TORNILLO PARA MAQUINAS MONOHUSILLOS

Los estudios teóricos avanzados que se han desarrollado en el transcurso de la historia han ido perfeccionando cada vez más el diseño de tornillos extrusores, se eliminó el anterior proceso de diseño por medio de tanteo experimental y sucesivas aproximaciones con el cual se fabricaron los primeros tornillos.

Hay tanta variedad en cuanto a tornillos que sería casi imposible hablar de cada uno, sin embargo se tratará de mencionar los más conocidos en la industria plástica. El tipo común de tornillos usados en la actualidad y hace 20 años para la extrusión en la industria de fibra de poliolefinas y para el policloruro de vinilo

(PVC) es el mostrado en la figura 16 - a, este posee sus tres zonas bien demarcadas, su canal de profundidad es decreciente. Es necesario tener en cuenta que la relación de compresión para procesar PVC debe ser menor a 2 ya que si no se cumple con esta condición se estaría expuesto a problemas graves en la calidad y en la seguridad de la maquina y del personal.

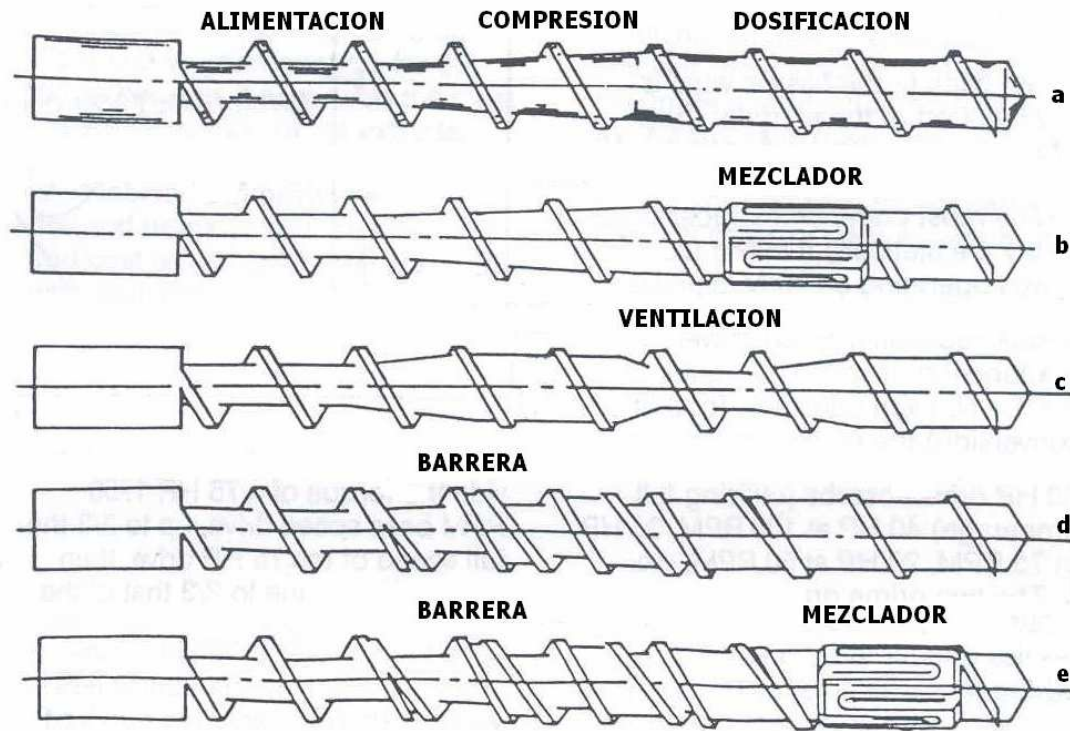
El tornillo conocido como el mezclador Maddock (*Maddock mixing screw*) siendo este el caballo de trabajo de la industria de película de polietileno, polipropileno y algunos vinilos con moderados alturas, la profundidad del canal para este tornillo es aproximadamente 0.15 pulgadas, se muestra en la figura 16 - b. El tornillo mezclador Maddock es similar al tornillo convencional de extrusión con la adición de tener después de la zona de compresión un mezclador con pequeñas flautas paralelas a la eje del tornillo, la mitad de estas con su fin abierto en dirección a la alimentación, y la otra mitad con un fin abierto a la descarga. Un reciente diseño a este tornillo disminuyo el espacio entre las flautas con el fin de evitar el estancamiento del material en el final de estas.

El tornillo doble etapa (*two stage screw*) o de ventilación es un diseño muy complejo utilizado con el fin de fundir el polímero antes de la mitad del tornillo, en su centro se desgasifica o se eliminan los gases volátiles a la atmósfera o al vacío, posteriormente el fundido es bombeado por la presión conseguida. La porción del tornillo antes de la ventilación es conocido como la primera etapa y la posterior a la ventilación como la segunda etapa como se muestra en la figura 16 – c.

El tornillo de barrera es la innovación en cuanto a diseño de tornillos, se dice que en 10 años estos tornillos predominaran en la industria. Los tornillos de barrera difieren de los anteriormente nombrados al poseer un doble filete el cual forma un segundo canal, en este el material fundido es separado del sólido; más adelante se planteara un modelo matemático el cual trabaja con tornillos de barrera como los que se muestran en la figura 16 - d. El ancho de la barrera aumentara ya que la capa fundida ira aumentando a medida que la capa sólida ira disminuyendo. Existe una modificación usada industrialmente la cual le adiciona al final de la barrera un mezclador, para aumentar el rendimiento de este o para disminuir la temperatura de la mezcla⁷ como se muestra en la figura 16 – e.

⁷ STANDARD, Davis. Know your extruder. En: Wire Tech Magazine. Vol. 1, No 1.(Enero 1999); p. 3.

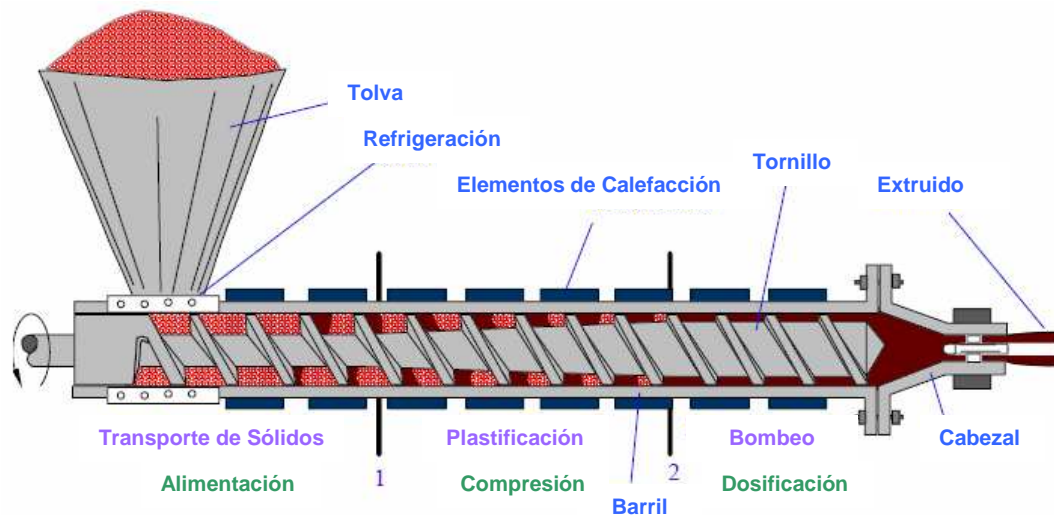
Figura 16. Tipos de tornillos para maquinas Monohusillo



5.4 PARTES DE UN TORNILLO CONVENCIONAL

En los tornillos convencionales se diferencian tres zonas principales: Alimentación, compresión y dosificación. Estas zonas se identifican por su longitud y por su alto en el filete el cual disminuye hacia la punta, pues el volumen del plástico fundido es menor que en forma granular o *pellets*. Con el tornillo de tres zonas básicamente se pueden trabajar todos los termoplásticos, dependiendo de la proporción entre la longitud de las tres zonas, el tornillo podrá o no entregar la capacidad de producción requerida. Otra consideración a tener en cuenta es que tan profundo se cortan los canales, en los canales grandes el polímero no se fundirá muy bien o demorará en hacerlo, dependiendo de la viscosidad del material, entre más viscoso sea, generará, más calor por cizallamiento, por lo que requerirá canales mas grandes. Por lo contrario si es más fluido, su calor generado será muy poco, deberá suministrársele gran parte de calor necesario para que plastifique.

Figura 17. Zonas de un tornillo extrusor

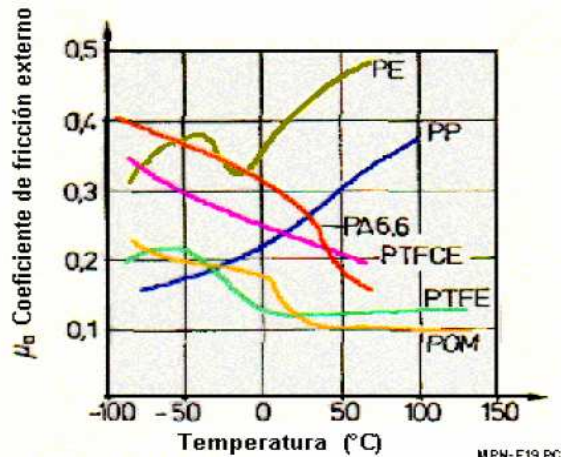


5.4.1 Zona de Alimentación. La sección de alimentación es el primer elemento del tornillo al que se le introduce polímero. Típicamente, en extrusores de agujero liso, ésta es la parte más profunda del tornillo. En los diámetros más pequeños (2,5" y menos) se debe prestar atención especial a esta sección para reducir el riesgo de falla por torsión debido a la sobrecarga de torque en el tornillo.

Cuando el material cae desde la tolva al tornillo, este tiende a girar pero se lo impide en parte la fricción con las paredes estacionarias del cilindro. El avance del material dependerá de la diferencia entre los coeficientes de fricción entre el material-tornillo y material-cilindro, se busca que la segunda sea mayor, por este motivo, los tornillos deben ser pulidos escrupulosamente, con el propósito de reducir la fricción entre su superficie y la del polímero.

Por otro lado, la fricción también depende de la temperatura del material y el comportamiento puede ser bien diferente en cada caso, para lograr menor fricción entre el tornillo y el material, en muchas ocasiones es necesario refrigerar una zona del tornillo y en otras ocasiones habrá que calentarlo, en otras ocasiones se hará necesario refrigerar el cilindro en la zona de alimentación, para conseguir el efecto deseado.

Figura 18. Coeficiente de Fricción vs. Temperaturas



5.4.1.1 Sección de Alimentación – Profundidades y Longitudes. La altura del filete en la alimentación es una de las variables iniciales para realizar un buen diseño en los tornillos, existen gran variabilidad de reglas utilizadas para el cálculo de esta altura. La conocida como la regla de dedo, la cual dice que la sección de alimentación de un tornillo no debería ser superior a:

$$F_{D(MAX)} = 0.2 * (D) \quad (1)$$

Donde $F_{D(MAX)}$ (*food deep*) es la distancia máxima a la cual se puede alcanzar en la zona de alimentación, (D) es el diámetro del tornillo. Si el diseño del tornillo requiere una zona de alimentación superior a este valor de $F_{D(MAX)}$, deben hacerse los cálculos de torque correspondientes. La principal función de la sección de alimentación de un tornillo es transportar sólidos.

En este estudio se aconseja utilizar una altura de alimentación con la siguiente relación:

$$2H_D \angle H_A \angle 4H_D \quad (2)$$

$$H_A \angle 2H_D \quad (3)$$

La relación 2 de alimentación se define para las poliolefinas, tales como el polietileno (PE) y el polipropileno (PP). La relación 3 se aconseja usar cuando el material a procesar es policloruro de vinilo (PVC).

La teoría básica del transporte de sólidos determina que “el polímero debe adherirse al barril y deslizar sobre el tornillo, de tal forma que el polímero se desplace hacia delante”. Para que esto ocurra el coeficiente de fricción (COF) del polímero debe ser superior en la pared del barril que en la raíz del tornillo. De esta forma, algunos polímeros tienen inherentemente mejores COF que otros, y para ellos no se requieren secciones de alimentación largas. Típicamente, para la mayor parte de resinas una sección de alimentación con una longitud de cuatro o cinco diámetros medidos desde la garganta de alimentación, hará posible alcanzar suficiente presión para transportar el material hacia delante.

La longitud de la sección de alimentación debe alcanzar de ocho a diez diámetros. Una de las razones para tener mayores secciones de alimentación es hacer que se introduzca más calor a la forma sólida de la resina, haciendo que se adhiera al barril y de esta forma ayude en el desarrollo de la presión requerida para tener un buen transporte de sólidos. En este punto también debería mencionarse que en el caso de materiales pobremente alimentados, también es benéfico el uso de enfriamiento interno en el tornillo, para mantener la raíz fría y mejorar el COF entre la resina y el acero en la raíz del tornillo.

Debería mencionarse que para encontrar una forma de mejorar el transporte de sólidos en resinas que tienen un COF deficiente, en Europa durante la primera etapa de la década de 1960 se creó la tecnología de alimentación ranurada; desde esa época su aceptación ha venido en crecimiento, a paso lento pero firme.⁸

5.4.2 Zona de Compresión, Transición o Plastificación. La sección de compresión o transición en un tornillo convencional es donde tiene lugar la mayor parte de la fusión del polímero. Esta es la porción del tornillo que trasciende desde la profundidad de alimentación hasta la profundidad de dosificación, y es donde se efectúa trabajo sobre la resina, haciendo que se produzca la fusión. En esta sección del tornillo, la raíz se vuelve gradualmente menos profunda, forzando al material hacia delante de la pared del barril, donde la fusión se lleva a cabo. En esta zona los pellets son comprimidos y fundidos en una masa que presenta un grado de adherencia a las superficies del tornillo y las paredes del cilindro.

⁸ WOMER, Timothy W. Lo que usted debe saber sobre diseños de Tornillos [en línea]. EEUU: Xaloy Inc. 2005. [consultado 04 de Febrero, 2006]. Disponible en Internet: <http://www.plastico.com/>

Los materiales poliméricos tienen la mayoría su punto de fusión bien definido, es por eso que al llegar a este punto la densidad de material es una característica a tener muy en cuenta en el momento del diseño de los tornillos extrusores. La zona de compresión debe por ello ser diseñada no solo para hacer más compacto el material sino para adaptar la variación de tamaño del canal con la velocidad de fusión y el cambio de volumen que tiene lugar cuando el material pasa desde su estado sólido a su estado viscoso. Una característica importante sino la más importante a tener en cuenta en el momento de diseñar tornillo extrusores es la relación de compresión, esta variable es la principal responsable del buen procesamiento de un material polimérico; es probablemente el término más usado en la terminología de diseño de tornillos, aunque no por eso es el mejor aplicado ni el mejor comprendido. Hay dos maneras de mantener esta relación en el diseño de un tornillo, la primera es disminuir la profundidad del canal, bruscamente o de modo continuo a lo largo del tornillo, la segunda es disminuir gradualmente el paso del filete manteniendo constante la profundidad del canal.

Se define como relación de compresión la razón entre el volumen de una vuelta del canal en la zona de alimentación y el volumen del canal en la última vuelta antes de la boquilla.⁹

5.4.3 Zona de Dosificación. La sección de dosificación o bombeo en el tornillo es donde se completa la fusión del polímero, y donde se genera presión para superar la restricción impuesta por el cabezal. Generalmente esta zona tiene una profundidad de canal pequeña, se tiene más conocimiento de cómo funciona esta zona respecto a las otras dos, pues en esta el material es completamente viscoso y se puede estudiar matemáticamente y comprobar experimentalmente con el fin de calcular el flujo de material a través de esta zona.

⁹ ANGUITA DELGADO, Op. cit., p. 56

6 MODELAMIENTO MATEMÁTICO EN EL TORNILLO EXTRUSOR

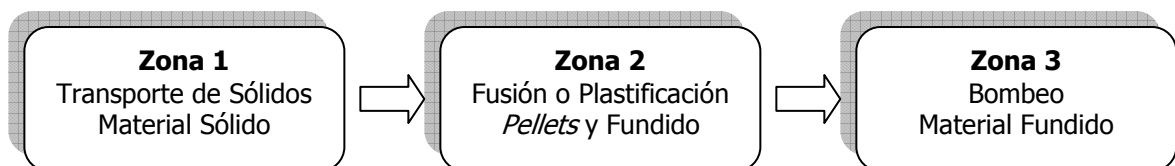
Las extrusoras son una de las máquinas más versátiles de la industria transformadora de plásticos, además de funcionar como una bomba, funciona como un transportador, plastificador y en algunos casos cambiador de calor y mezclador.

Los estudios y avances realizados hasta la actualidad en el campo de los tornillos extrusores nos permiten tener un punto de partida para realizar la metodología para el cálculo de estos. Muchos escritores y científicos interesados en este campo han descrito el comportamiento de las tres principales variables que afectan el comportamiento del polímero: La temperatura, la presión y la fusión. Para cada variable se han planteado diferentes modelos matemáticos los cuales por medio de teoremas logran descifrar a gran escala los sucesos que ocurren dentro del tornillo.

La fusión del polímero dentro de la extrusora se realiza a través del transporte de este, desde la tolva hasta la boquilla. En realidad el proceso de fusión del polímero se da en el transcurso del tornillo extrusor por cada una de las zonas descritas en el capítulo 3.4: Alimentación, compresión y dosificación.

En cada una de estas zonas ocurre un proceso que contribuye a la homogénea y rápida fusión del polímero, a continuación se mostrará un diagrama en el cual se resume cada una de las funciones que realiza cada zona. El comportamiento global de la máquina depende desde luego del buen funcionamiento de estas variables.

Figura 19. Diagrama de las funciones de las zonas del tornillo extrusor



La variable que une y de la cual depende el volumen de producción y eficiencia de las industrias productoras a base de polímeros, es el flujo volumétrico (\dot{V}), en

realidad este flujo es una caudal, que esta relacionado directamente con la velocidad del flujo y el área. Esta variable es la determinante en la velocidad de la línea de producción y la eficiencia de esta.

El flujo volumétrico se puede considerar en tres etapas: El flujo con el cual se transportaran los sólidos o *pellets* (\dot{V}_1), el flujo de plastificación o fusión del polímero (\dot{V}_2), y el flujo de bombeo o dosificación del polímero fundido (\dot{V}_3).

Cuando (\dot{V}_1) < (\dot{V}_3) se dice que la extrusora esta trabajando al vacío o sin alimentación, generando con esto un producto nada homogéneo el cual concibe una calidad deficiente. Es por esta razón que se debe diseñar un tornillo, en el cual los flujos sean de la siguiente forma:

$$\dot{V}_1 \geq \dot{V}_2 \geq \dot{V}_3$$

Al cumplirse esta condición se podrá garantizar una buena alimentación de una zona a la otra. Para comenzar el estudio de cada zona en el caso de la fusión del polímero es necesario dividirlos por funciones.¹⁰

6.1 ZONA 1: TRANSPORTE DE SÓLIDOS

El transporte de sólidos es una función la cual solo se cumple en la zona 1, la zona de alimentación. Se debe especificar que para la simplificación de errores y problemas en la alimentación es recomendado utilizar el polímero en un estado peletizado (*pellets*), ya que si es un polvo la baja densidad de este generaría serios problemas. Después del paso del polímero a través de la tolva, el tornillo extrusor cumple la función de transportarlo. Las partículas individuales siguen trayectorias rectas y paralelas al eje del tornillo.¹¹

Se debe establecer que para un buen transporte del material el coeficiente de fricción del barril o cilindro (μ_B) debe ser mayor que el coeficiente de fricción del

¹⁰ *Ibíd.*, p. 142.

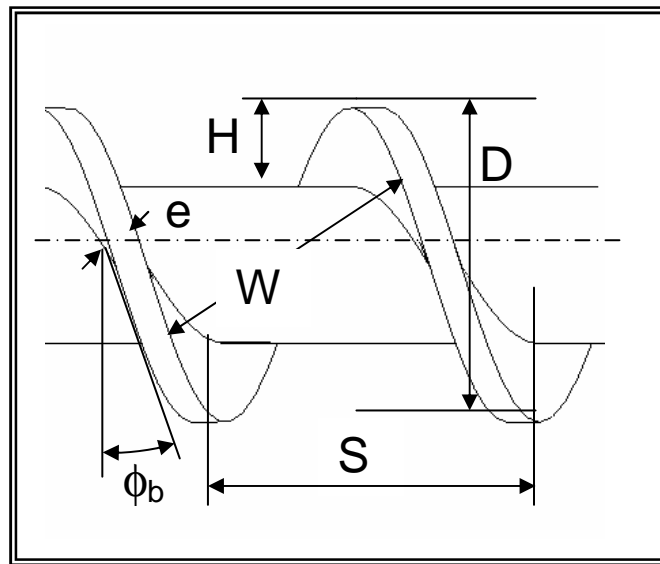
¹¹ *Ibíd.*, p. 143.

tornillo (μ_s); en caso contrario el flujo de material no existiría, es por esto que el tornillo extrusor debe cumplir con la característica mecánica de tener un acabado superficial tipo espejo.¹² En el transcurso de la longitud de esta zona, las partículas se irán compactando formando así una masa maciza o tapón, la cual será denominada de ahora en adelante como la capa sólida. Se considera que el tornillo se encuentra en un constante movimiento y que el cilindro permanece estático.

Todos los tornillos extrusores están compuestos por una serie de partes, las cuales serán de gran utilidad en el desarrollo de los modelos:

- **Espesor de filete (e):** Considerado como el ancho de cada uno de los filetes que compone el tornillo extrusor. La normalización establece que se debe utilizar un espesor de $0.1D$.
- **Diámetro Nominal del Tornillo (D):** Correspondiente al diámetro exterior del mismo.

Figura 20. Geometría de un tornillo extrusor



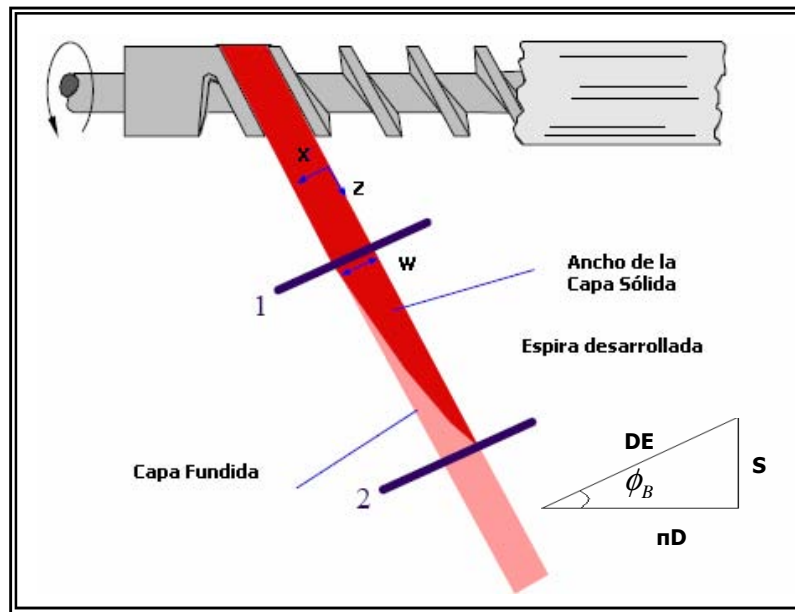
Fuente: Realizada por el Ingeniero Juan Carlos Otero

- **Paso Diametral (S):** Es la distancia consecutiva entre dos puntos del filete.

¹² El coeficiente de fricción se explica con mayor claridad en el Capítulo 3.4

- **Altura del Filete (H):** Es la profundidad máxima del canal, desde el punto más alto del filete hasta el diámetro nominal del tornillo.
- **Angulo de Paso (ϕ_B):** El tornillo tiene un paso, cuyo valor es generalmente cercano al diámetro D . El ángulo de desarrollo helicoidal del tornillo, es decir el ángulo de la hélice en la superficie del cilindro se puede calcular considerando una espira del tornillo extrusor desarrollada como lo observamos en la figura 21 y de esta manera por medio de su desarrollo obtener el ángulo de paso.

Figura 21. Desarrollo de una espira de un tornillo



Donde DE es el desarrollo de la espira y πD el perímetro. El ángulo de desarrollo helicoidal esta definido por la siguiente definición:

$$\phi_B = \tan^{-1} \left(\frac{S}{\pi * D} \right) \quad (4)$$

- **Ancho del canal (W):** Es la distancia medida entre un determinado punto de un filete y el correspondiente de uno inmediato.

$$W = (S * \cos \phi_B) - e \quad (5)$$

- **Angulo de Paso de la raíz del tornillo (ϕ_S):** Medido desde el diámetro interno del tornillo.

$$\phi_S = \tan^{-1} \left(\frac{S}{\pi * (D - 2 * H)} \right) \quad (6)$$

- **Angulo de Paso Medio ($\bar{\phi}$):** Es la relación entre el paso diametral, el diámetro nominal y la altura del filete.

$$\bar{\phi} = \tan^{-1} \left(\frac{S}{\pi(D - H)} \right)$$

(7)

6.2 ZONA 2: FUSIÓN O PLASTIFICACIÓN

En la zona de compresión o plastificación se encuentra aquella porción del tornillo donde coexiste el polímero sólido como el fundido. En diseños pasados se estudiaban la primera y tercera zona por facilidad en los cálculos ya que estas poseen un diámetro constante en los tornillos convencionales, se dejaba sin estudiar la zona de plastificación debido a la complejidad en los cálculos, y a su estructura variable. Anteriormente el objetivo de los estudios en extrusión era predecir las velocidades de flujo, las cuales eran controladas por la primera y tercera zona; es por esta razón que en la antigüedad se diseñaban tornillos calculados basados en la zona de alimentación y la dosificación, uniéndolas entre si, de cualquier manera, sin saber nada acerca del mecanismo de fusión.

El conocimiento teórico de la zona de plastificación requirió de muchos estudios y de muchos autores que se desmentían el uno al otro, con el fin de describir un comportamiento similar, al que el polímero lleva. A través del tiempo muchos científicos se han interesado en el tema, llevando consigo pequeños y grandes avances acerca de este tema, estos estudios han sido muy útiles ya que nos ofrecen las condiciones de partida a la hora de estudiar y diseñar la zona de plastificación, es una herramienta de gran importancia para así poder predecir el comportamiento del tornillo, del polímero y la calidad del extruido.

Cabe distinguir que existen dos mecanismos por los cuales se tiene lugar a la plastificación o fusión. El primero implica el calor que genera el cilindro a las partículas del polímero, la velocidad con la cual ocurre este fenómeno depende de la superficie de transmisión del cilindro, de la conductividad térmica del plástico y de la distribución de flujos dentro del canal del tornillo, es conocido con el fenómeno de conducción.

El segundo mecanismo se basa en el cambio de la energía mecánica en calor mediante la deformación del plástico sólido o también llamado el fenómeno de la disipación viscosa.¹³

En el primer proceso se consume energía eléctrica y su mecanismo de transferencia de calor, es la conducción. Este mecanismo es muy difícil de controlar, debido a las pérdidas que no solamente calientan al polímero, sino también a la máquina y al ambiente a su alrededor.

En el segundo caso la fricción entre las moléculas genera un aumento de temperaturas, por lo tanto su origen es mecánico, de tal manera que es suministrada por el tornillo de la máquina. Esta energía es más eficiente y puede llegar a reemplazar a la generada por la conducción térmica en las máquinas adiabáticas.

Estos dos mecanismos de fusión están rígidamente regidos por ciertas variables, en el caso del primer mecanismo depende esencialmente de la superficie del tornillo definida matemáticamente como (πDL) , en el segundo caso la velocidad de extrusión esta regida por la potencia mecánica que puede transmitir el eje del tornillo. El segundo mecanismo tiene una ventaja sobre el primero, el polímero se calienta más uniformemente y con menos peligro de sobre calefacciones locales; de igual manera su principal desventaja es que este mecanismo es de uso exclusivo para polímeros relativamente blandos a una temperatura ambiente.

¹³ Ibíd., p. 149.

7 MODELO DE FUSIÓN

7.1 RESEÑA HISTÓRICA

Los trabajos investigativos acerca del comportamiento de un material poliméricos en su proceso de fusión han sido abarcados por muchos autores a través de la historia.

En 1959 Maddock revelo detalles sobre el mecanismo de fusión, el realizaba experimentos extruyendo polietileno sometido diferentes condiciones de trabajo. Cuando alcanzaba en el extrusor un estado de régimen estacionario paraba el tornillo y enfriaba la maquina, es decir el conjunto cilindro – tornillo, una vez el material se solidificaba en el canal del tornillo se sacaba este del cilindro, posteriormente separaba el material del tornillo con diferentes cortes para así visualizar las diferencias.¹⁴

En 1966 Tadmor fue el primero en realizar estudios acerca de mecanismo de fusión de los tornillos extrusores generando el punto de partida para el desarrollo posterior del modelo de fusión. Posteriormente en 1971 Vermeulen y Sundstrom analizaron el problema experimentalmente y teóricamente. En 1976 Pearson analizo el problema teóricamente en detalle, proporcionándole solución a las ecuaciones primarias del modelo de fusión. En 1990 Lee & Han estudiaron las fuerzas que actúan en la cama del sólido realizando el balance de las fuerzas. En 1992 Rauwendaal analizo el cambio de temperaturas en la cama del sólido. En el 2001 Maria del Pilar Noriega, una científica colombiana de la ciudad de Medellín confirmo el modelo propuesto por Pearson comprobando científicamente los datos teóricos que predecían el tiempo y el lugar donde ocurre la fusión total del polímero.

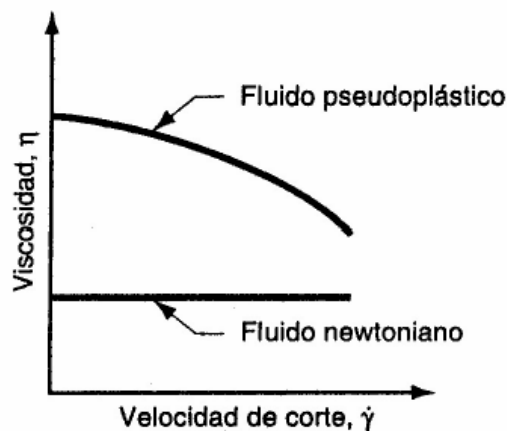
¹⁴ Ibíd., p. 148.

7.2 FUSIÓN DEL POLÍMERO

El modelo considera un trozo sólido homogéneo e isotrópico de un polímero el cual está contenido en un canal que tiene un ancho, el cual de ahora en adelante será conocido como (W) (*width*), una placa caliente en constante movimiento irá empujando el polímero con unas condiciones estables de velocidad y temperatura. El problema es analizado en dos dimensiones ya que la temperatura y la velocidad son funciones de las coordenadas x y y solamente. En el eje z no ocurren variaciones de las condiciones ya que se considera infinito. En el inicio del proceso la película fundida es tan pequeña que se iguala a cero, esta capa se irá incrementando en la dirección x positiva. El ancho de la película fundida se denota con $\delta(x)$, como se puede analizar con el paso del tiempo esta variable es desconocida, y es uno de los principales objetivos a conocer por medio del modelo. Como lo precisamos anteriormente, una película fundida se forma en la superficie del barril, como resultado de la calefacción del barril o como resultado de la generación del calor debido a la fricción.

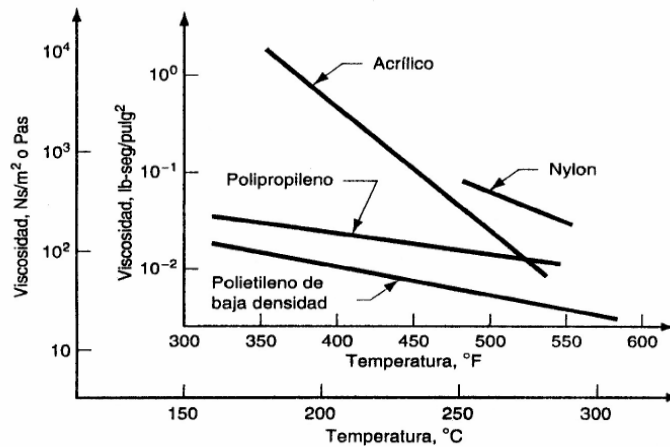
El polímero en su estado fundido presenta varias características, una de ellas es la viscosidad (η), esta es una propiedad del fluido que relaciona el esfuerzo cortante experimentado durante el flujo del fluido con una velocidad de corte, estas velocidades son generalmente altas en un proceso de extrusión ya que las velocidades de flujo lo son, los esfuerzos cortantes se incrementan a medida que la velocidad de corte lo hace, por esta razón es necesario de presiones significativas para realizar el proceso.

Figura 22. Comportamiento de la viscosidad con relación a la velocidad de corte



Como se observa en la figura 22, la viscosidad para un polímero pseudoplástico decrece con la velocidad de corte, lo cual indica que el fluido se hace más delgado a velocidades de corte más altas. En el caso de algunos polímeros se nota las diferencias como se muestra en la figura 23, con una velocidad de corte de 10^3 seg^{-1}

Figura 23. Viscosidad en función de la temperatura de algunos polímeros



El transporte del polímero es generado por la fricción viscosa en la superficie del cilindro; determinada por las tensiones de cizalladura que se forman en la película fundida. Para entender el mecanismo de fusión es necesario tener en cuenta la naturaleza del sólido. Para un cuerpo rígido y perfectamente incomprensible que se mueve hacia la interfaz sin rotar la velocidad de fusión de la interfaz debe ser independiente de la coordenada x , porque la velocidad del sólido será uniforme a través de x . Es necesario que $\delta(x)$, $P(x)$, la velocidad y la temperatura en la película presuman valores que satisfagan este requerimientos, asimismo las ecuaciones de movimiento y energía deben tener unas condiciones apropiadas.

Cada una de las partículas que descienden desde la tolva hacia el tornillo se mueve en dirección a la boquilla, atravesando la zona de transporte. En algún punto de la zona de compresión o fusión, el cilindro comienza a calentar al sólido fundiendo y formando una película de polímero fundido sobre la superficie del cilindro. Según las observaciones efectuadas por Noriega se concluyo que la fusión del polímero empieza realizarse desde la tercera espira del tornillo extrusor. En este momento los *pellets* ya no están sueltos entre si, ya que poseen una presión suficiente que junto al ablandamiento generado por la temperatura tiende a aglomerarse formando una capa sólida la cual tiene una forma helicoidal, a pesar de esta

aglomeración cada *pellets* conserva su individualidad y se pueden observar claramente.

Las condiciones estacionarias de la velocidad de fusión pueden ser generalmente función de x , pero estas variaciones son muy pequeñas. Una variación en la velocidad de fusión requiere que el sólido se deforme o rote o ambos.

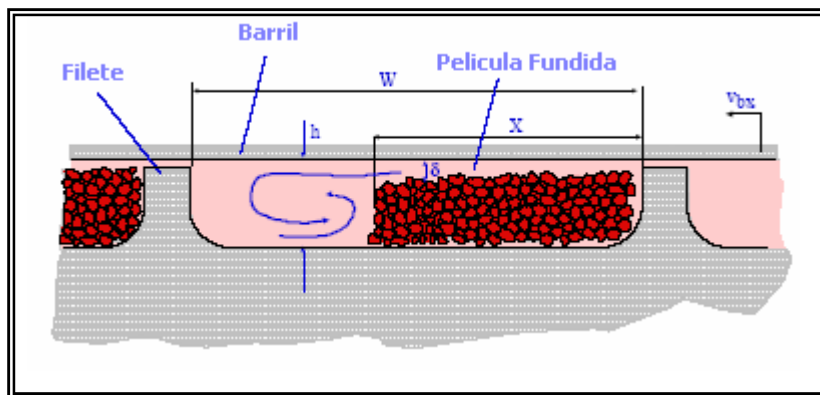
7.3 CONSIDERACIONES PLANTEADAS POR EL MODELO DE FUSIÓN

El modelo de fusión planteado por Pearson simplifica variables con el fin de minimizar los cálculos, es por esta razón que este modelo debe plantearse algunas hipótesis, estas serán de gran ayuda para evitar fenómenos que evitarían llevar un buen desarrollo. No con esto se dice que el modelo carezca de validez, en lo absoluto, poco a poco y con el desarrollo de este se podrá notar que las suposiciones tienen bases sólidas para realizarlas.

- El modelo asume los fluidos newtonianos, en los cuales la viscosidad es constante a una temperatura dada y no cambian con la velocidad de corte $\left(\dot{\gamma}\right)$.
- Se conjetura que va a existir un estado estacionario, es decir, en una sección transversal la distribución de velocidades, de temperatura y los límites de la cama sólida no van a variar con el tiempo, los límites de cada cama estarán bien definidas.
- La sección transversal del canal y la de la cama sólida se asumen con una forma rectangular, como se muestra en la figura 24.
- Las condiciones de la maquina extrusora se consideran constantes, la fusión del polímero ocurre solamente en la superficie del cilindro.
- La cama sólida compuesta por los *pellets* del polímero es considerada homogénea, deformable y continua.
- El ancho de la película es mucho más pequeño que el ancho del canal $\delta/w \ll 1$. Esto junto con el pequeño número de Reynolds en la película, justifica la aproximación a la lubricación.

- No existe deslizamiento en las paredes del canal.
- La velocidad en el fondo del canal de la cama sólida es constante, este supuesto se considera debido a que las lentas variaciones en esta velocidad, así como las propiedades físicas (la densidad de la cama sólida), las condiciones de funcionamiento (la temperatura del barril), y la geometría (la profundidad del canal) pueden ser explicadas por un procedimiento del cálculo que implica finitos y pequeños incrementos en el fondo del canal. Esto se puede ver como "la aproximación extendida de la lubricación" por la que los cambios en la dirección del flujo principal se asumen pequeños con respecto a los cambios en la dirección perpendicular del flujo, y los cambios locales son funciones de las condiciones locales solamente.
- Las propiedades físicas y termo-físicas se asumen constantes y la interfaz de película de la capa sólida fundida se asume a una temperatura especificada T_m , el punto de fusión.
- Las fuerzas gravitacionales son despreciables.

Figura 24. Corte transversal mostrando como el ancho en la zona fundida aumenta en la dirección del flujo

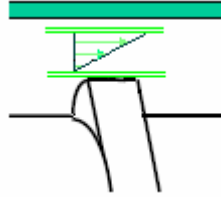


7.4 VELOCIDAD RESULTANTE

La velocidad es una, sino las más importante variable que se debe tener en cuenta con este modelo. Se consideran dos láminas paralelas, separadas una distancia (Y), entre las cuales se encuentra un fluido de viscosidad (η). En el tiempo $t = 0$, donde el sistema se encuentra en reposo la placa superior se pone en dirección z

a una velocidad constante (v), debido a la aplicación de una fuerza (F). Con el transcurso del tiempo el fluido cobra un movimiento y finalmente alcanza un perfil de velocidades en un estado estacionario, relacionando la velocidad con la fuerza de la siguiente forma:

Figura 25. Perfil de velocidades



Fuente: Autor

$$\frac{F}{A} = \eta \frac{V}{Y} \quad (8)$$

Donde F/A se denomina el esfuerzo de corte (σ), A el área de la placa en contacto con el fluido. El esfuerzo cortante se propagara en función de x , debido a un movimiento en dirección $X(\sigma_{yx})$, el cambio de velocidades que presenta el fluido en x se presenta como:

$$\sigma_{yx} = \eta \frac{\partial V_x}{\partial Y} \quad (9)$$

Además se tiene que el cambio en la velocidad es un cambio en la distancia (L) sobre el tiempo (t), obteniendo:

$$\frac{\Delta V}{\Delta X} = \frac{\Delta L / \Delta t}{\Delta X} = \frac{\Delta L / \Delta y}{\Delta t} = \frac{\dot{\gamma}}{\Delta X} = \dot{\gamma} \quad (10)$$

Donde $\frac{\Delta L / \Delta y}{\Delta t}$ representa la velocidad de deformación. Si se sustituye (10) en (9) obtenemos la ley de Newton de la viscosidad para fluidos newtonianos.

$$\sigma_{yx} = \eta \dot{\gamma} \quad (11)$$

Este modelo considera tres velocidades diferentes las cuales se experimentan en la relación entre el tornillo extrusor y el cilindro barril. La velocidad del tapón o del sólido será denominada (V_a), la velocidad del tornillo relativa al barril (V_b) y la velocidad del canal (V_c). Como anteriormente lo habíamos dicho el barril se

encuentra en un estado estacionario respecto al tornillo, que genera un gradiente de velocidad en la película fundida situada entre la capa sólida y la superficie del cilindro.

Se supone que el tornillo esta en estado estacionario y el que gira seria el cilindro, la superficie del cilindro se moverá a una velocidad tangencial de la siguiente forma:

$$V_b = \pi * D_b * N \quad (12)$$

Donde D_b es el diámetro del barril o cilindro y N la frecuencia de la rotación dada en $rpm - rps$. El estado estacionario se mantiene porque el polímero fundido es arrastrado por la superficie del cilindro, hacia la parte posterior del canal, mientras que la capa sólida se mueve a una velocidad constante en la interfase, debido a su reagrupación continua. Esta velocidad debe ser descompuesta en sus dos componentes respecto a los ejes x y z :

$$V_{bx} = V_b * \text{Sen } \phi_b \quad (13)$$

$$V_{bz} = V_b * \text{Cos } \phi_b \quad (14)$$

El sólido se moverá una velocidad V_{sz} la cual tiene su componente V_{sx} . Entonces la velocidad relativa entre la superficie del barril y la cama sólida esta definida por:

$$V_j = V_b - V_{sz} \quad (15)$$

$$|V_j| = (V_j - V_j)^{1/2} = (V_b^2 + V_{sz}^2 - 2V_b V_{sz} \cos \theta)$$

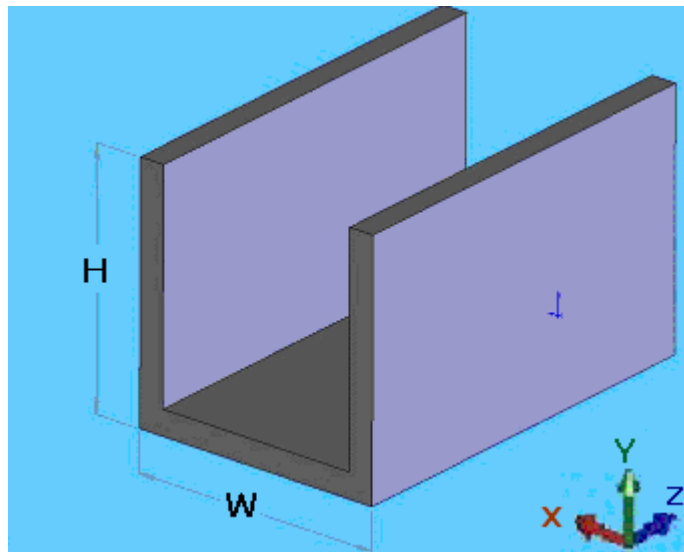
La velocidad de cizalladura $\left(\dot{\gamma}\right)$ esta relacionada por V_j / δ , donde δ es el espesor de la película fundida.

La cantidad de material fundido en la interfase por unidad de esta, depende de la velocidad de transmisión de calor hacia y desde dicha interfase. Esto depende del espesor de la película fundida y de la velocidad de la capa sólida, los cuales en este momento son valores desconocidos. La variación del espesor de la película en el fondo del canal es de hecho pequeña, por lo tanto es el componente cruzado V_{bx} de la velocidad en el canal el que determina la velocidad de remoción de la

fusión. En la figura 21 se muestra las coordenadas del desarrollo del canal, es muy importante tener en cuenta que H , la profundidad del canal o alto de filete en la zona de alimentación va a permanecer constante, en la figura 26 se muestra la ubicación de las coordinas de cada variable que compone el canal.

La cantidad de material fundido transportado y acumulado en el canal se igualara con la cantidad de sólido que funde en la interfase.

Figura 26. Sistema de coordenadas en el canal del tornillo



Fuente: Autores

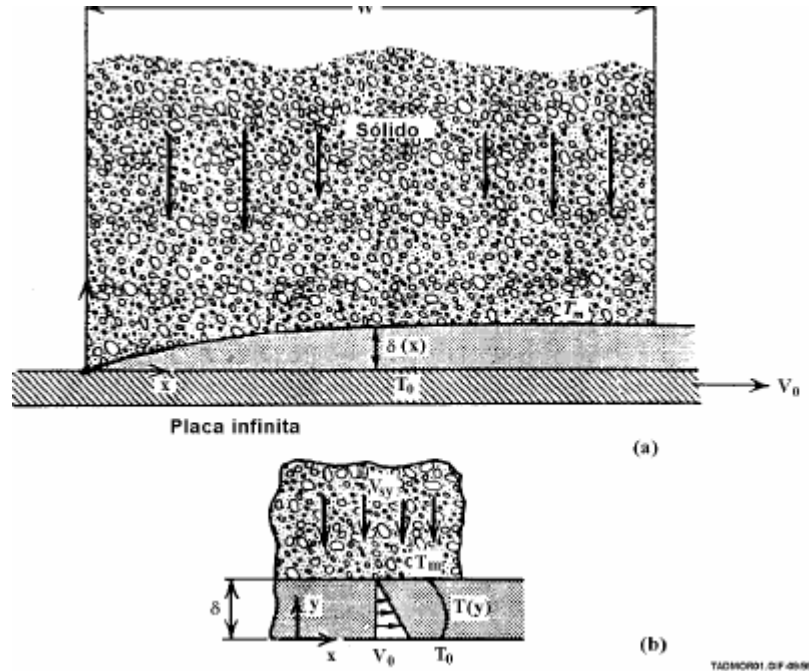
7.5 LA TEMPERATURA

El calor producido por la lamina caliente se considera a una temperatura T_0 para la interfaz sólido-fundido a $T = T_m$ asumiendo que el polímero es policristalino. En cada parte del cilindro se adquirirá una temperatura que no variará con respecto al tiempo (T_b), esta temperatura será transmitida desde el cilindro a través de la película del fundido, hasta la interfase de la capa sólida; es aquí cuando sucede la fusión y en este punto es donde la temperatura se igualara al punto de fusión.

Cuando se trabaja con un polímero el cual su punto de fusión no está bien definido en el caso de los amorfos, a temperaturas altas este estaría en estado de un liquido viscoso, y al enfriarlo se vuelve cada vez más elástico hasta que llega a la

temperatura de transición vítrea T_g , en este momento este polímero se convertirá en un sólido duro, rígido y frágil. Lo que sucede es que, conforme disminuye la temperatura, el polímero se contrae porque las cadenas moleculares se mueven menos y se atraen más.

Figura 27. Representación esquemática del fenómeno de la fusión.



Fuente: TADMOR, Zehev. Principles of polymer processing. New York: A Wiley, 1979. p. 309. ISBN 0471843202

Para el cálculo de la transmisión de calor, se presume que la cama sólida tiene una profundidad absoluta en la dirección y , esto es justificado porque la difusividad térmica de los polímeros es muy pequeña y la cama sólida se mueve constantemente en la interfaz. Estas condiciones generan una rápida caída en la temperatura inicial de la cama sólida, es por esta razón que la temperatura del sólido (T_s) es considerada a la temperatura ambiente.

El espesor de la película fundida es muy pequeño comparado con el ancho de la capa sólida en la totalidad de la zona de plastificación. Es por esto que puede suponerse que la película fundida esta confinada entre dos planos paralelos infinitos, el superior a la temperatura del cilindro o barril (T_b) y el inferior a la temperatura de la interfaz de la película fundida (T_m).

Cuando la temperatura de la película fundida es demasiado grande, esta superara la temperatura del barril y ocurrirá un cambio en la dirección de la transmisión de calor. Se considera despreciable la transmisión de calor desde el polímero fundido que circula en la zona posterior del canal, hacia la capa sólida a través de la interfaz radial, esto se justifica por que aquí la transmisión de calor es muy poco eficaz. Es por eso que el calor necesario para fundir el polímero esta dado por:

$$C_m * \bar{\theta} * (T_b - T_m) \quad (16)$$

Donde $\bar{\theta}$ es la temperatura media adimensional definida de la siguiente forma:

$$\bar{\theta} = \frac{2}{3} + \frac{Br}{12} \quad (17)$$

7.6 RELACIÓN ENTRE EL ANCHO DE LA CAMA SÓLIDA Y EL ANCHO DEL CANAL

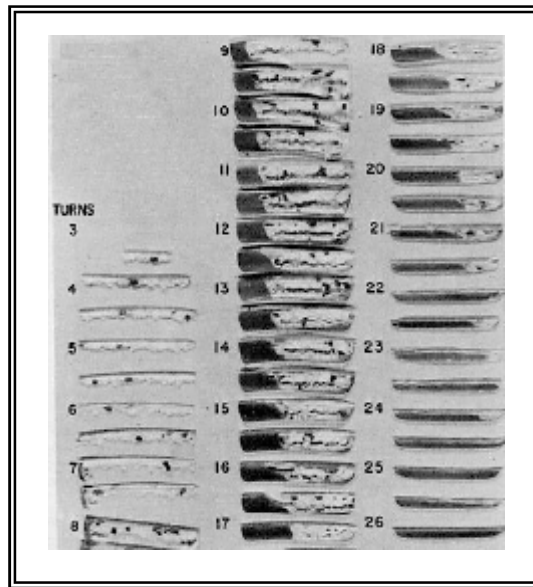
Si realizamos un corte transversal al tornillo justo desde la tercera espira en adelante encontraríamos una porción de polímero sólido y otra porción de polímero fundido en cada pozo o canal, a medida que se va avanzando a través de la longitud del tornillo la cantidad de polímero fundido va aumentando en proporción como el sólido va disminuyendo, creando una relación X/W ; donde X es el ancho de la cama sólida contenido en el pozo, y W el ancho del canal o pozo.

Figura 28. Vista transversal del canal mostrando las dos zonas.



Según experimentos realizados por Maria del Pilar Noriega se puede comprobar como la fusión del polímero ocurre desde la tercera espira del tornillo extrusor como se puede observar en la figura 5.6.

Figura 29. Demostración de la fusión del polímero después de la tercera vuelta



Fuente: NORIEGA, Maria del Pilar. Presentación Review of Melting in Single Screw Extruders. Medellín: ICIPC, 2005. p. 6.

Debido a la velocidad relativa entre el barril y el fondo del canal del tornillo, origina un movimiento circular en la piscina del fundido. Las principales diferencias entre el flujo de la zona de alimentación y la zona de compresión son: El polímero fundido tiene una persistente incorporación al canal y el ancho del canal va a variar de punto a punto. El polímero sólido será presionado hacia la parte posterior del filete, la gran parte de la fusión ocurre entre la interfase de la película fundida y el polímero sólido, esta altura se mantendrá constante ya que el polímero sólido continua reagrupándose y entrando a esta interfase donde funden y con esto llevando a que el ancho de la capa sólida vaya disminuyendo a medida que avanza por el tornillo.

7.7 DESARROLLO MATEMÁTICO DEL MODELO DE FUSIÓN

El modelo propuesto por Tadmor y desarrollado matemáticamente por Pearson es muy complejo y matemáticamente difícil de entender, es por esta razón que simplificaremos los cálculos matemáticos realizados por Pearson brindándoles las ecuaciones constitutivas del modelo. La ecuación de continuidad del flujo (18), la ecuación de movimiento (19) y la definición de viscosidad (20) respectivamente, Esta definición fue la utilizada por Pearson para desarrollar el modelo¹⁵.

$$\frac{\partial V_x}{\partial X} + \frac{\partial V_y}{\partial Y} = 0 \quad (18)$$

$$\frac{\partial P}{\partial X} = \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial Y} \quad (19)$$

$$\eta = m_0 e^{-a(T-T_m)} \dot{\gamma}^{-n} \quad (20)$$

Aplicando la ley de Newton de la viscosidad e integrando en función de y se obtiene la siguiente definición.

$$-\left(\frac{\partial V_x}{\partial Y}\right) = C_1 e^{[a(T-T_m)/n]} \quad (21)$$

Si $a = 0$, es decir que la temperatura es independiente de la viscosidad, el perfil de velocidad para un fluido newtoniano es lineal. En cambio si $a \neq 0$ el perfil de velocidades es función de la temperatura.

La ecuación de energía es una de las ecuaciones constitutivas del modelo de fusión de ella se desprende gran parte de las investigaciones realizadas por otros autores sobre este tema.

$$\rho_m C_m \left(V_x \frac{\partial T}{\partial X} + V_y \frac{\partial T}{\partial Y} \right) = K_m \frac{\partial^2 T}{\partial Y^2} - \sigma_{xy} \frac{\partial V_x}{\partial Y} \quad (22)$$

¹⁵ El desarrollo matemático del modelo de fusión es basado en los resultados dados por Pearson.

Donde ρ_m , C_m y K_m son las propiedades termo físicas del polímero fundido, como son la densidad, el calor específico y la conductividad térmica respectivamente del polímero fundido. Con una conductividad térmica en x asumida mucho mas pequeña que la conducción térmica en y . Se especifican ciertas condiciones de trabajo

$$\begin{aligned} T(0) &= T_o & V_x(0) &= V_o & V_y(0) &= 0 \\ T(\delta) &= T_m & V_x(\delta) &= 0 \end{aligned} \quad (23)$$

Lo que simplifica la ecuación de energía (22) a:

$$0 = K_m \frac{\partial^2 T}{\partial Y^2} - \sigma_{xy} \frac{\partial V_x}{\partial Y} \quad (24)$$

La velocidad $V_y(\delta)$ en una posición x es determinada por la velocidad de fusión en la interfase, para obtener el balance de energía:

$$K_m \left(-\frac{\partial T}{\partial Y} \right)_{Y=\delta} = \rho_m [-V_y(\delta)] \lambda + K_s \left(-\frac{\partial T_s}{\partial Y} \right)_{Y=\delta} \quad (25)$$

Donde el primer término es la tasa de conductividad térmica dentro de la interfaz por unidad de área, es decir el calor conducido desde la película caliente dentro de la interfaz, el segundo termino indica la tasa de fusión en la interfaz por unidad del área de la interfaz que regula el calor de fusión; el último término es la tasa de conductividad térmica fuera de la interfaz por unidad de área de esta, esta parte puede ser solucionada considerando una pequeña porción de película y de sólido, como se mostró en la figura 27, en ella se asume que el sólido ocupa una región $Y \geq \delta$ y esta en constante movimiento V_{sy} dentro de la interfaz. Donde λ es el calor latente de fusión, K_s la conductividad térmica y T_s la temperatura del sólido. El problema se reduce a una dimensión utilizando la convicción planteada de que la temperatura varia solamente en el eje y , de esta manera la ecuación de la energía se reduce a

$$\rho_s C_s V_{sy} \frac{\partial T_s}{\partial Y} = K_s \frac{\partial^2 T_s}{\partial Y^2} \quad (26)$$

Donde ρ_s , C_s y K_s son las propiedades termo físicas del polímero sólido; como son la densidad, el calor específico y la conductividad térmica respectivamente del polímero sólido. Sudstrom y Young resolvieron estas ecuaciones numéricamente después las convirtieron en ecuaciones diferenciales parciales usando técnicas

ordinarias. Pearson basándose en esta metodología simplifico los cálculos, igualmente el uso variables adimensionales dándole una explicación física a los resultados.

$$\theta = \frac{T - T_m}{T_o - T_m} \quad \eta = \frac{Y}{\delta} \quad (27)$$

$$U_x = \frac{V_x}{V_o} \quad U_y = \frac{V_y}{V_o(\delta_o/W)}$$

Llegando a la ecuación del movimiento en función de la temperatura y de la viscosidad.

$$\frac{\partial}{\partial \eta} \left[e^{b\theta} \left(-\frac{\partial U_x}{\partial \eta} \right)^n \right] = 0 \quad (28)$$

$$(29)$$

Donde,

$$b = -a(T_o - T_m)$$

Pearson realizó varias maneras matemáticas de resolver este problema utilizando la convección, realizo el estudio para los fluidos newtonianos con una temperatura independiente de la viscosidad y descuidando la convección llegando a calcular la velocidad de fusión por ancho del canal en términos de la viscosidad y la temperatura:

$$W_L = \left\{ \frac{V_o \rho_m [K_m(T_o - T_m) + \mu(V_o^2/2)]^* W}{C_s(T_m - T_{so}) + C_m \bar{\theta}(T_o - T_m) + \lambda} \right\}^{1/2} \quad (30)$$

Donde $K_m(T_o - T_m) + \mu(V_o^2/2)$ es la suma del calor transmitido por la conductividad térmica y el generado por la disipación viscosa, el numerador hace referencia a la energía necesaria para que el sólido se caliente de T_{so} hasta fundir a T_m . La velocidad de fusión incrementa proporcionalmente a la raíz cuadrada de la velocidad y del ancho del canal. Al incrementar la velocidad de la lámina de material fundido incrementaría proporcionalmente la disipación viscosa.

Como lo precisamos en el capítulo 5.4 la velocidad de cizalladura esta directamente relacionada con el ancho de la película, y V_{bx} es el componente de la velocidad encargado de la remoción del material. En el inicio del proceso de fusión, desde la tercera espira; la relación $X/W = 1$ ya que $X = W$, y al finalizar la fusión

se debe tener $X \approx 0$, pasa así tener una fusión al 100%, si remplazamos X por W , T_b por T_o , V_{bx} reemplaza a V_0 en el primer termino y V_j reemplazando a V_0 en el segundo término; para obtener la velocidad de fusión por unidad de la distancia del canal.

El ancho de la cama sólida se puede expresar en función de variables conocidas y como función de z haciendo un balance diferencial de material en la dirección del canal.

$$W_{L(Z)} = \left\{ \frac{V_{bx} * \rho_m \left[K_m (T_b - T_m) + \left(\frac{\mu}{2} \right) * V_j^2 \right] * X}{\lambda + C_s * (T_m - T_s)} \right\}^{1/2} \quad (31)$$

En esta ecuación los efectos de la convección sobre la temperatura se obvian en la película fundida. Sin embargo estos efectos son relevantes y en cambio poseen un mecanismo matemático muy complejo de solucionar, como se indico en el capitulo 5.5, el calor necesario para fundir el polímero se relaciona por $\bar{\theta}$ y por el numero de Brighman.

$$Br = \frac{\mu * V_j^2}{K_m * (T_b - T_m)} \quad (32)$$

Si se tiene en cuenta la transmisión de calor, en especial la ecuación térmica y se deriva la ecuación (30) basados en las variables precedentes, por un factor $\sqrt{2}$ se obtendría la siguiente expresión según Pearson:

$$W_{L(Z)} = \left\{ \frac{V_{bx} * \rho_m \left[K_m (T_b - T_m) + \left(\frac{\mu}{2} \right) * V_j^2 \right] * X}{2 \left[\lambda + C_s * (T_m - T_s) + C_m * \bar{\theta} * (T_b - T_m) \right]} \right\}^{1/2} \quad (33)$$

La cantidad del sólido que entra en un diferencial de volumen situado en z es igual a la cantidad de sólido que sale en $\Delta Z + z$ más la cantidad de fundido que se produce en ΔZ . El cambio de la cama sólida se obtuvo por un balance de masa, donde se relaciona el polímero que entra y el polímero que sale del canal quedando entre estos un restante constante en el desarrollo del tornillo, dado de la siguiente forma:

$$\rho_s * V_{sz} * (H - \delta) * X \Big|_z - \rho_s * V_{sz} * (H - \delta) * X \Big|_{z \rightarrow \Delta Z} = W_{L(Z)} * \Delta Z \quad (34)$$

El límite $\Delta Z \rightarrow 0$, se obvia, y el cambio del espesor de la película en el fondo del canal, se reduce a:

$$-\frac{d(HX)}{dz} = \frac{W_{L(Z)}}{\rho_s * V_{SZ}} \quad (35)$$

Ahora bien, si se relaciona el ancho de la cama sólida con la velocidad se obtendrá una ecuación de la siguiente forma:

$$-\frac{d(HX)}{dz} = \frac{\phi \sqrt{X}}{\rho_s * V_{SZ}} \quad (35)$$

Donde,

$$\phi = \left\{ \frac{V_{bx} * \rho_m \left[K_m (T_b - T_m) + \left(\frac{\mu}{2} \right) * V_j^2 \right]}{2 \left[C_s * (T_m - T_s) + C_m * \bar{\theta} * (T_b - T_m) + \lambda \right]} \right\}^{1/2} \quad (36)$$

Para una profundidad constante del canal, la ecuación (35) se integra obteniendo:

$$\frac{X_2}{W} = \frac{X_1}{W} \left[1 - \frac{\psi (Z_2 - Z_1)}{2H} \right]^2 \quad (37)$$

Donde X_1 y X_2 son los anchos de la cama sólida en las localizaciones Z_1 y Z_2 respectivamente y el grupo adimensional ψ se define como la potencia de fusión en el tornillo extrusor.

$$\psi = \frac{\phi}{V_{SZ} * \rho_s * \sqrt{X}} \quad (38)$$

Así cuando se ejecutan los cálculos, para pequeños incrementos $\Delta Z = Z_2 - Z_1$, el ancho de la cama sólida en la salida X_2 se puede calcular con la ecuación (37) para el valor a la entrada X_1 . Esta última expresión define el perfil de la cama sólida y su relación directa con el ancho del canal.

En la zona de compresión se presenta un problema por su conicidad en el diámetro, es por esta razón que es necesario definir este suceso de la siguiente manera para una única sección con un estrechamiento constante:

$$-\frac{dH}{dz} = A \quad (39)$$

Si se realiza un estudio matemático utilizando las variables conocidas del tornillo extrusor, el estrechamiento o la conicidad en la zona de dosificación puede ser calculado de la siguiente manera:

$$A = \frac{H_A - H_D}{\frac{E_C * D}{\text{Sen} \phi_b}} \quad (40)$$

Donde H_A y H_D son las alturas del filete en las zonas de alimentación y de compresión respectivamente; E_C el numero de espiras de la zona de compresión y D el diámetro nominal del tornillo.

Al integrar la ecuación (37) en función de la altura de los filetes se obtuvo como resultado la relación X/W para la zona de compresión¹⁶.

$$\frac{X_2}{W} = \frac{X_1}{W} * \left[\frac{\psi}{A} - \left(\frac{\psi}{A} - 1 \right) * \sqrt{\frac{H_1}{H_2}} \right]^2 \quad (41)$$

Donde X_2 y X_1 son los anchos de la cama sólida en el fondo del canal localizados exactamente y respectivamente a las alturas H_2 y H_1 . Estas alturas se obtienen solucionando la ecuación (39), quedando definidas como:

$$H_2 = H_1 - S * \text{Tan}(\phi_i) \quad (42)$$

Donde (S) es el paso diametral del tornillo y (ϕ_i) el diámetro interno de la conicidad, este puede ser calculado por medio de la siguiente ecuación:

$$\phi_i = \text{Tan}^{-1} \left(\frac{d_D - d_A}{2 * S * E_C} \right) \quad (43)$$

¹⁶ TADMOR, Zehev. Principles of polymer processing. New York: A Wiley, 1979. p. 309 – 504. ISBN 0471843202

Donde (d_d) y (d_A) son los diámetro de raíz de las zonas de dosificación y de alimentación respectivamente.

Las ecuaciones constitutivas de este modelo, (36)-(37)-(38)-(41), se relacionan con un grupo adimensional ψ que en términos termo-físicos expresa el cociente de la velocidad de fusión por unidad de la interfaz $\left(\phi \sqrt{X_1} / X_1 \right)$ de la masa local sólida total $(V_{sz} * \rho_s)$, donde (ρ_s) es la densidad de la cama sólida local.

La velocidad de la cama sólida al principio de la fusión se obtiene partiendo considerando al flujo volumétrico como un caudal de la siguiente manera:

$$\dot{V} = V_{sz} * A \quad (44)$$

Donde el flujo volumétrico esta relacionado con el flujo másico de la siguiente forma:

$$\dot{V} = \dot{M}_K * \rho_s \quad (45)$$

Reemplazando el flujo volumétrico (45) la ecuación (46):

$$\frac{\dot{M}_K}{\rho_s} = V_{sz} * A \quad (46)$$

Despejando V_{sz} , se obtiene la velocidad con la cual el sólido se desplaza a través del tornillo, donde A es el área del canal definido como WH :

$$V_{sz} = \frac{\dot{M}_K}{\rho_s * H * W} \quad (47)$$

8 MODELO DE PRESION

8.1 RESEÑA HISTÓRICA

Los primeros estudios serios desarrollados para el modelamiento en operaciones de procesamiento de polímeros, especialmente para plastificación de protuberancia, extrusión; fueron realizados por Dupont Delaware (EE.UU.) cuyos resultados fueron publicados en los años 50, paralelamente Suiza con Maillefer también presento modelos importantes. Posteriormente se realizaron trabajos, uno de ellos presentado por Bernhardt, el cual resumió todo lo logrado hasta ese momento por varios autores, pero fue quizás Mckelvey quien dio un primer acercamiento sensato y unificado en el marco de las ecuaciones de la conservación de la masa, la energía y el mecanismo en los cambios de fase.

Fue Klein quien hizo el primer modelo por computador del proceso de transformación de polímeros, pero no tuvo mayor influencia debido a que el material era obsoleto para los años 70. Posteriormente Tadmor presento el primer modelo completo para la plastificación de protuberancia incluyendo el mecanismo de transporte de los sólidos desde la tolva, la rotación del tornillo, la fusión del material y la circulación del mismo. Para la fecha se desarrollo un software de simulación llamado *Extrud*, el cual se basaba en los modelos descritos en los libros de Tadmor y de Klein.

En los años 70, muchas universidades e industrias trabajaron en el desarrollo de modelos asistidos por computador para el proceso de extrusión o protuberancia, moldeado por inyección, calandrado y otros procesos. Pero fue la compañía Austin en 1978 quien lanzo al mercado el primer paquete para rellenos del molde en inyección *Moldflow*, y fue entonces cuando se confiaron las predicciones de procesamiento a dichos *software*.

En la década de los 80, grupos norteamericanos y europeos realizaron investigaciones en polímeros considerando elementos finitos que atravesaran canales y dados dentro de su proceso, creando el software como *Fidat*, *Polyflow*, *Nekton* Y *Policad*. En la década siguiente, el énfasis fue en la viscoelasticidad, las

simulaciones 3D y la predicción de la orientación, las tensiones residuales y los fenómenos que ocurren después de la solidificación. En esta década también se avanza en los campos de tornillos gemelos, termoformado, moldeado por compresión, soplado de película, moldeado de inyección por reacción y por gas asistido ¹⁷

8.2 TORNILLOS DE BARRERA

En el capítulo 3 numeral 3 se hace alusión al tipo de tornillos usados en la industria de transformación de polímeros, en la actualidad se emplean tornillos de protuberancia con vuelo convencional, debido a su comercialización y su versatilidad para el proceso, sin embargo existen industrias con tecnología más avanzada que tienen en uso tornillos de barrera.

Los tornillos de barrera constan de tres partes importantes que son: la alimentación, la barrera y una sección medidora en donde se mezcla el material dispersiva o distributivamente. La diferencia principal entre los de barrera y los de mezclado convencional es la adición de un filete adicional conocido como el vuelo de la barrera *Flight Barrier*, situado en la sección de transición del tornillo, cuyo propósito es proporcionar los medios para separar el fundido dentro del polímero.

El filete de la barrera, el cual separa los dos canales, tiene una distancia radial mayor comparada con la del filete principal; gracias a esto se logra aumentar el flujo de material fundido en el canal de los sólidos, debido a que esta separación de fase aumentara la capacidad de fusión del tornillo extrusor, dicho aumento se debe a que se elimina el fenómeno de cama baja, es decir, tener una mayor cantidad de material sólido en contacto con el barril.

Nuevos diseños de tornillos de barrera han divulgado la introducción de un segundo vuelo para mejorar la eficacia de la fusión y del mezclado, a pesar del

¹⁷ CASTILLO, Ramón; STRUTT David y VLACHOPOULOS John. En: Análisis y Diseño de procesos de polímeros: Computer Aident. Vol. 2; p.1.

extenso desarrollo matemático para la simulación de tornillos en extrusores monohusillo en donde solo se tenían en cuenta la geometría del tornillo y las características del polímero, se omitían las condiciones del proceso; la ausencia de un modelo exacto debido a la complejidad implicada generó una barrera en la evolución del modelamiento, algunos de los modelos planteados no han sido probados a fondo debido a ausencia de datos de comportamiento.

Es necesario usar modelos con ecuaciones simples que describan la acumulación de presión, conducción térmica entre el polímero y el barril y la fusión del polímero en la zona de alimentación. El problema debe ser abordado desde la conducción del polímero fundido en un husillo de barrera, de manera que sea viable definir el comportamiento de la presión de la masa fundida, se debe partir de conocer un perfil de temperaturas, luego realizar el tratamiento del fluido como si fuera Newtoniano y posteriormente incluir las consideraciones necesarias para asumirlo pseudoplástico. Se deben tener en cuenta ciertas consideraciones dentro de un proceso interactivo, las cuales serán nombradas en la explicación de los experimentos realizados.¹⁸

8.3 SIMULACIÓN DE LA FUSIÓN A TRAVÉS DE LOS CABEZALES

El polímero fundido que atraviesa el cabezal es por lo general constante y no isotérmico, en ocasiones planar o asimétrico y con frecuencia completamente tridimensional. Las ecuaciones de la conservación de la masa y de energía para un flujo constante es decir, el flujo de arrastre con un número de Reynolds muy bajo deben ser solucionadas. Hay pocos desafíos recientes en la solución del flujo de arrastre, pues implican modelos puramente viscosos.

En la extrusión hay una tendencia de que el líquido menos viscoso encapsule al más viscoso, no se sabe si los líquidos se pegan o se deslizan en la línea de contacto, en conclusión no se sabe como los líquidos poliméricos fluyen en la vecindad inmediata de superficies sólidas, esto se conoce como el fenómeno de la

¹⁸ CASTILLO, Ramón; STRUTT, David y VLACHOPOULOS, John. Experiment and Simulation with Barrier Screws. Ontario, 2002. p. 1.

piel de tiburón el cual tiende a ocurrir a una presión cercana a 0.14 MPa.¹⁹ Con métodos numéricos actualmente disponibles, no es posible predecir el inicio de este fenómeno importante.

La física de cómo los líquidos poliméricos fluyen encima o pierden el contacto con una superficie sólida no esta bien entendida. Otro problema que es difícil tratar actualmente es el fenómeno de la acumulación en el labio del dado *Die Drool*.

La viscoelasticidad es un desafío importante debido a que en el pasado han dado predicciones pobres, entonces se ha optado por hacer experimentos simples basándose en algunas consideraciones los cuales han obtenido gran proximidad a la realidad ya que han reducido costos y tiempo porque se reemplazo el ensayo y error en la fabrica por el ensayo y error en la pantalla.

8.4 MODELAMIENTO MATEMÁTICO DEL MODELO DE PRESIÓN

El modelo de presión considera principalmente dos flujos los cuales han de ser tenidos en cuenta para el modelamiento matemático del problema, el flujo de arrastre $\left(\dot{V}_a\right)$, debido a la fricción del material entre la superficie del barril y las hélices del tornillo; este flujo es el responsable del transporte del material desde la tolva alimentadora hasta el cabezal; el segundo flujo considerado es el flujo de presión o de retroceso $\left(\dot{V}_p\right)$, opuesto al anterior y generado por la presión originada en el cabezal de la maquina extrusora, específicamente por la boquilla o por el plato rompedor, estos dos flujos son los encargados de darle forma el flujo volumétrico en la maquina extrusora.

$$\dot{V} = \dot{V}_a - \dot{V}_p \quad (48)$$

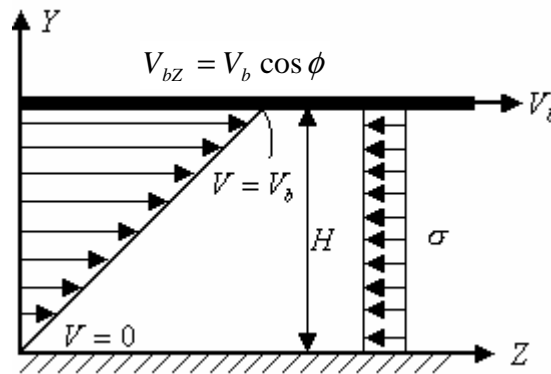
¹⁹ CASTILLO; STRUTT y VLACHOPOULOS, Op. cit., p. 3.

8.4.1 Flujo de Arrastre. El flujo de arrastre tiene lugar debido a que el material fundido en los canales del tornillo se adhiere a las paredes internas del cilindro y al propio tornillo en rotación. Consideremos un flujo de arrastre donde el cambio de presión $\Delta P = 0$ para un fluido newtoniano.

Como se expone en el capítulo 5.4, la velocidad del barril esta definida como:

$$V_{bZ} = V_b \cos \phi$$

Figura 30. Perfil de velocidades para el flujo de arrastre



Fuente: Autor

De la figura 30 se puede observar que la función que describe el comportamiento de la velocidad de fusión es una función lineal, el flujo volumétrico se analizara bidimensionalmente (plano yz), para facilidad de análisis y calculo. Se supone el caso en que la velocidad del tornillo es cero y el barril posee velocidad, llamada velocidad del barril V_b , la velocidad de flujo se incrementa en las proximidades del barril, el esfuerzo de corte es contrario al sentido de la velocidad debido a que estas son inversamente proporcionales.

En el capítulo 5.4 se explica la Ley de Newton de la viscosidad para fluidos Newtonianos, la cual será el punto parida para encontrar la ecuación del cambio de presión en la maquina extrusora.

Integrando la velocidad a $\dot{\gamma} = \frac{dV}{dY} \rightarrow dV = \dot{\gamma} dY$ ambos lados se obtiene: (49)

$$V = \dot{\gamma} Y + c_1 \quad (50)$$

Al evaluar $Y = 0$ y $V = 0$, se obtiene que $c_1 = 0$; cuando $Y = H$, se halla:

$$\dot{\gamma} = \frac{V}{H} \quad (51)$$

En términos generales:

$$\dot{V} = \bar{V}A \quad (52)$$

Donde $A = WH$, $\left(\dot{V}\right)$ es el flujo volumétrico, (\bar{V}) la velocidad media, (A) el área, (W) el ancho del canal y (H) la altura del canal.

El capítulo 5.4 se refiere al el esfuerzo de corte (σ) en un fluido Newtoniano:

$$\begin{aligned} \sigma &= \eta \dot{\gamma} \\ \sigma &= \eta \frac{dV}{dY} = Co \end{aligned} \quad (53)$$

Integrando ambos lados de la ecuación, se obtiene:

$$\eta V = c_0 Y + c_1 \quad (54)$$

Al evaluar $V = 0, Y = 0$, se obtiene que $c_1 = 0$:

$$V_z = \frac{Co}{\eta} Y \quad (55)$$

Si se evalúa $Y = H$ y $V = V_B$, se tiene:

$$V_B = \frac{Co}{\eta} H \quad Co = \frac{V_B}{H} \eta \quad (56)$$

Al reemplazar la ecuación (56) en la ecuación (55) se obtiene la velocidad en el eje z :

$$V_z = \frac{V_{Bz}}{H} Y \quad (57)$$

Por medio del teorema de Navier Stokes (Anexo 1), se halla la velocidad media:

$$\bar{V} = \frac{\int_0^H \frac{V}{H} dY}{\int_0^H dY} = \frac{V_{bZ}}{2} \quad (58)$$

Se reemplaza en la ecuación (52) encontrando la velocidad de arrastre

$$\dot{V}_a = \frac{V_{bZ}}{2} (WH) F_d \quad (59)$$

Donde, (F_d) es el factor de dimensión y está definido por:

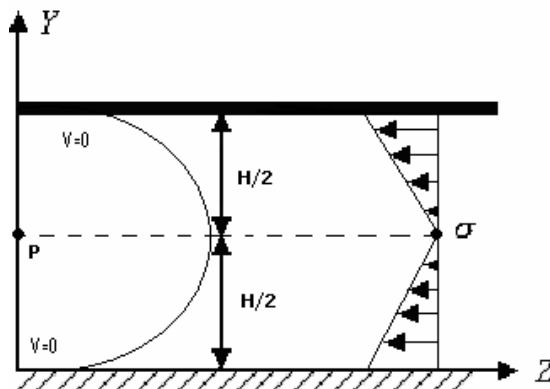
$$F_d = \left(1 - 0.571 \frac{H}{W} \right) \quad (60)$$

Reemplazando (V_{bZ}) en la ecuación (59) se tiene:

$$\dot{V}_a = \frac{1}{2} V_T \cos \phi_b (WH) F_d \quad (61)$$

8.4.2 Flujo de Presión. Para simplificar la teoría se hacen algunas suposiciones tales como asumir que el diámetro del tornillo es mucho mayor que la profundidad del canal $(H \ll D)$, así mismo se supone que el fondo del canal y el cilindro son dos placas paralelas fijas.

Figura 31. Perfil de velocidades para el flujo de presión



Debido al efecto de la presión ejercida por el tornillo sobre el material, obliga al mismo a fluir entre las placas paralelas fijas, el cilindro y el tornillo; las otras consideraciones hechas son las siguientes:

- La velocidad del fluido es igual a cero en la pared del canal y en las cercanías del tornillo
- El fluido es independiente del tiempo, es decir que no cambia con el tiempo.
- El patrón de flujo es constante a todo lo largo del canal.
- El flujo es isotérmico

Se debe partir de la ecuación del movimiento, la cual se resume a:

$$-\frac{dP}{dZ} - \frac{d\tau_{yz}}{dY} = 0 \quad (62)$$

El capítulo 5.4 se refiere al el esfuerzo de corte (σ) en un fluido Newtoniano:

$$\sigma = -\eta \frac{dV_z}{dY} \quad (63)$$

Al despejar la ecuación (62) el esfuerzo cortante e integrando a ambos lados se obtiene:

$$\tau_{yz} = \frac{dP}{dZ} dY + C_1 \quad (64)$$

Al evaluar $Y = 0$ y $\tau_{yz} = 0$, se obtiene que $c_1 = 0$. Al reemplazar la ecuación (63) en la ecuación (64), despejando e integrando a ambos lados:

$$V_z = -\frac{dP}{dZ} \frac{Y^2}{2\eta} + \frac{C_2}{\eta} \quad (65)$$

Evalutando $V_z = 0$, se obtiene:

$$c_2 = \frac{dP}{dZ} \frac{H^2}{8\eta} \quad (66)$$

Reemplazando (66) se puede organizar la ecuación:

$$V_z = \frac{dP}{dZ} \frac{H^2}{8\eta} \left[1 - \frac{4Y^2}{H^2} \right] \quad (67)$$

Por medio del teorema de Navier Stokes (Anexo 1) se halla la velocidad media:

$$\bar{V}_z = \frac{\frac{H}{2} \int_{-\frac{H}{2}}^{\frac{H}{2}} V_z dY}{2 \int_{-\frac{H}{2}}^{\frac{H}{2}} dY} \quad (68)$$

Luego de resolver y evaluar se reemplaza en la ecuación (52) obteniendo

$$\dot{V}_p = \frac{dP}{dZ} \frac{1}{12} \frac{WH^3}{\eta} F_p \quad (69)$$

Donde F_p se define como:

$$F_p = (1 - 0.625 \frac{H}{W}) \quad (70)$$

Teniendo los dos flujos involucrados en el transporte del material y al reemplazar las ecuaciones (69) y (61) en la ecuación (48) se obtiene la ecuación para un flujo unidireccional de un canal desarrollado para un fluido newtoniano de acuerdo con el *paper EXPERIMENTS AND SIMULATIONS WITH BARRIER SCREWS*²⁰:

El modelo de presión hará uso de esta última ecuación para el cálculo de la variación de la presión dentro del canal del tornillo, en donde (W) varía de acuerdo al perfil de fusión, y (H) puede permanecer constante en las zonas cilíndricas del tornillo y variar en la zona de compresión o transición.

$$\text{En los tornillos de } \dot{V} = \frac{1}{2} V W H F_d \cos \phi_b - \frac{1}{12} \frac{W H^3 F_p}{\eta} \frac{dP}{dZ} \text{ barrera, } (W) \text{ y } \quad (71)$$

²⁰ Ibíd., p. 2.

(H) están definidos por el diseño inicial del tornillo y varían en cada punto del mismo. En el programa de modelamiento del perfil de presión, se debe obtener los datos de (W) y (H) en cada espira a partir de la tercera vuelta para calcular el aumento de presión que esta dado por $\left(\frac{dP}{dZ}\right)$:

$$\frac{dP}{dZ} = \frac{6\eta(VWHF_d \cos\phi_b - 2\dot{V})}{WH^3 F_p} \quad (72)$$

Al integrar $\left(\frac{dP}{dZ}\right)$ en función de una longitud se obtendría el cambio de presión a lo largo del tornillo extrusor, de tal manera que se pueda observar como la presión cambia a medida que se avanza en la longitud del tornillo de la siguiente forma:

$$\Delta P = \frac{-12(N_E)\pi D\eta}{WH^3 \sin\phi_m F_p} * M_K - 0.5\pi D \cos\phi_m H W F_d \quad (73)$$

Donde N_e es el número de espiras evaluadas, ϕ_m es el ángulo de la hélice evaluado en la altura media del canal, calculado de la siguiente forma:

$$\phi_m = \tan^{-1}\left[\frac{S}{\pi(D-H)}\right] \quad (74)$$

Se utiliza ϕ_m para mejorar los resultados ya que la forma geométrica del canal no es rectangular, es trapezoidal.

8.5 CALCULO DEL DIÁMETRO NOMINAL DEL TORNILLO

El diámetro nominal del tornillo extrusor es una de las variables de entrada necesarias para realizar el modelo de fusión y el modelo de presión, como en casos anteriores existen diversas formas de realizar el cálculo y son necesarias de algunas suposiciones para eliminar las restricciones de cálculo.

En esta metodología se planteará una forma relativamente sencilla para realizar el cálculo matemático del diámetro del tornillo extrusor. Es necesario tener en cuenta los siguientes planteamientos:

- Se considera un flujo volumétrico exento de perdidas y de presión, por ende el flujo volumétrico es netamente de arrastre, definido en la ecuación (58).
- La velocidad relativa tangencial del barril V_{bZ} para las poliolefinas debe ser menor que 0.8m/s para evitar las alzas en las velocidades de cizalladura que afectarían directamente al material.
- Se puede suponer el paso diametral igual al diámetro, obteniendo un ángulo de hélice igual a 0,9529.
- Si el paso diametral es diferente al diámetro se debe definir el paso en función del diámetro $S = f(D)$.
- El ancho del canal se definió en el capítulo 5.4 en la ecuación (5), el espesor definido como 0.1D y para tornillos con paso igual al diámetro.

El ancho del canal en función del diámetro queda definido así:

$$\begin{aligned}
 W &= S * \cos\phi_b - e \\
 W &= D * \cos\phi_b - \frac{D}{10} \\
 W &= D * (0.9529) - 0.1D \\
 W &= 0.8529D
 \end{aligned} \tag{75}$$

- La altura del filete en la zona de dosificación se refiere con el diámetro por medio de la siguiente relación:

$$0.0148D^{0.774} \leq H_D \leq 0.0415D^{0.774} \tag{76}$$

- El factor de dimensión calculado de la ecuación (60), corrige la suposición de rectangularidad en el canal. Este factor puede ser asumido como $F_d = 0.96$.

Se tienen en cuenta cada una de las anteriores hipótesis y al reemplazar en la ecuación (61) del flujo volumétrico se encuentra el diámetro en función del flujo, de la siguiente manera.

$$\begin{aligned}\dot{V} &= \frac{1}{2} V_b * \cos \phi_B * W * H_D * F_d \\ \dot{V} &= 0.5 * (0.7 \text{ m/s}) * (0.9529) * (0.8529 D) * (0.0267 D^{0.774}) * (0.96) \\ \dot{V} &= 7.291 \times 10^{-3} D^{1.774}\end{aligned}\tag{77}$$

Al despejar el diámetro de la ecuación (77), se encuentra la relación en función del flujo volumétrico del valor del diámetro del tornillo extrusor:

$$D = \left(\frac{\dot{V}}{7.291 \times 10^{-3}} \right)^{\frac{1}{1.774}}\tag{78}$$

9 MODELO DE TEMPERATURA

La temperatura es una variable influyente a lo largo de todo el proceso de extrusión pero es al final en donde se le analiza a fondo e independientemente de la otras dos variables, en la actualidad se están desarrollando experimentos los cuales manejan el cálculo matemático de la influencia directa de esta variable en la extrusión.

La temperatura esta directamente relacionada con el comportamiento químico molecular de cada material, en este modelo propuesto teóricamente es necesario aclarar que se parte de consideraciones planteadas por distintos autores.

Como en los anteriores modelos, este parte de una serie de suposiciones que ayudar a evitar fenómenos que alterarían el buen desarrollo matemático del modelamiento.

- El juego radial δ_R del husillo se desprecia
- Las fuerzas gravitacionales se omiten
- El canal es considerado rectangular como en los anteriores modelos
- Las propiedades térmicas del sólido y del material fundido son constantes.
- El flujo convectivo es considerado en una única dirección
- El efecto convectivo es despreciable
- No existe deslizamiento en las paredes del cilindro ni del tornillo
- El flujo es considerado laminar
- La dependencia de la viscosidad con la temperatura no se tiene en cuenta
- La temperatura en la zona de alimentación es igual a la temperatura del sólido
- El fluido es considerado newtoniano
- Las ecuaciones serán consideradas para un sólido puro y para un fundido en igual estado

La ecuación de partida para el modelamiento matemático del perfil de temperatura es calculada por medio de balance de energía la cual incluye términos para la convección entre el polímero y la superficie del barril y para disipación viscosa²¹:

$$\rho C_p \dot{V} (T_{z+\Delta z} - T_z) = -h_B W \Delta z (T_z - T_b) + \eta \dot{\gamma}_{EFF}^2 W H \Delta z \quad (79)$$

De acuerdo con los resultados obtenidos en los estudios realizados por Noriega, la fusión del material comienza a partir de la tercera espira, entonces el valor de T_z dentro de la ecuación, será el mismo de T_M (Temperatura de fusión) a partir de la tercera espira.

De la ecuación (79) se conoce:

(ρ) es la densidad de fusión del material, (C_p) es el calor específico polimérico, (\dot{V}) el flujo volumétrico cuyo valor es un dato de entrada al modelo de presión y al de temperatura, h_B es la conductividad térmica del material en que esta fabricado el barril del tornillo extrusor, (W) es el ancho del canal, (T_{BZ}) es la temperatura del barril en z , (H) es la altura del filete la cual es constante en la zona de alimentación y varia en la zona de compresión.

La rata de cizalladura efectiva $(\dot{\gamma}_{EFF})$ también se conoce como la velocidad de fusión, la cual se calcula con la siguiente ecuación:

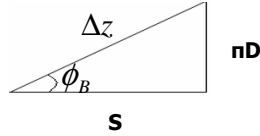
$$\dot{\gamma}_{EFF} = 0,772 * \left(\frac{6\dot{V}}{WH^2} \right) \quad (80)$$

La viscosidad (η) se asume constante por efectos de simplificación en los cálculos matemáticos, se hace necesario realizar un estudio variando dicha variable utilizando una de las teorías para el cálculo de la viscosidad, entre las cuales existen la de Carreau o la ley de potencias.

²¹ Ibíd., p. 3.

El cambio en la temperatura en el desarrollo de la espira (Δz), es calculado de la siguiente manera:

Figura 32. Triangulo del cálculo de Δz



Fuente: Autor

El objetivo del modelo de temperatura es determinar el valor $(T_z + \Delta z)$ denominada como el cambio de temperatura a través del desarrollo del tornillo, al despejarla de la ecuación se obtiene la expresión que permite calcularla:

$$(T_{z+\Delta z}) = \frac{W\Delta z \left(\eta \dot{\gamma}_{EFF}^2 H - h_B (T_z - T_B) \right) + T_z}{\rho C_p \dot{V}} \quad (81)$$

10 METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO DE TORNILLOS EXTRUSORES

En el transcurso del desarrollo de este trabajo se han dado los puntos de partida y las herramientas necesarias para un óptimo cálculo de la configuración geométrica de los tornillos extrusores para un eficaz desempeño, las cuales serán las variables de entrada para el desarrollo matemático de la fusión, de la presión y de la temperatura; que describirán el comportamiento a unas adecuadas condiciones de trabajo de la maquina extrusora.

El buen uso de los modelos matemáticos planteados, contando con datos confiables, permitirán aprovechar al máximo la eficiencia de la maquina logrando incluso superar la condiciones básicas de trabajo.

La metodología inicia con un conocimiento previo por parte del usuario del producto a fabricar, teniendo claridad que el material polimérico a procesar cumpla con condiciones mecánicas y químicas necesarias para el producto terminado. Es necesario conocer las propiedades físicas tales como la densidad en sus dos estados (sólido y fundido), la viscosidad, las temperaturas máximas de proceso, las condiciones térmicas entre otras. Se sugiere que si el conocimiento no es el adecuado para iniciar la metodología, se deben valer de una consulta previa acerca de los datos teóricos de cada material. Es de suma importancia tener claridad en el material, debido a que el diseño del tornillo depende en las propiedades de polímero.

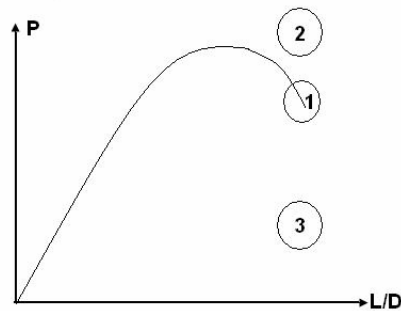
Contando con el material a trabajar se deben conocer las características reológicas de este, como son la velocidad de cizalladura y la viscosidad. En el caso de no tener estas variables se aconseja realizar un estudio reológico del material para conocer las propiedades de flujo del polímero en su estado fundido, al operar en condiciones de presión y temperatura constante, obtenido el índice de fluidez, es decir el flujo másico a través del cabezal durante un tiempo determinado.

El flujo másico para esta metodología será considerado como un dato de entrada basado en las condiciones de capacidad normales de la maquina y de las necesidades del usuario. En el inicio se debe partir asumiendo un flujo másico sin influencia de la presión y de las perdidas, posteriormente realizar el cálculo

matemático del diámetro del tornillo y de la altura del filete utilizando las diversas maneras existentes; sin descuidar las observaciones planteadas en este trabajo como la relación de compresión y las alturas adecuadas en las diferentes zonas.

La presión requerida por el cabezal es un dato de inicio y necesita de un estudio independiente relacionado con la geometría del mismo, previo al diseño del tornillo. La presión impuesta por el cabezal debe ser menor a la alcanzada por el tornillo para evitar ser una restricción del flujo del material a través de él. En la grafica 32 se observa una zona 1 donde se muestra la situación donde la presión del cabezal es menor que la desarrollada por el tornillo, siendo este el caso ideal, si se obtuviera una presión superior a la del tornillo como es el caso de la zona 2 el material no lograría fluir a través del cabezal, en el caso de la zona 3 se estaría malgastando la presión alcanzada y por ende la potencia utilizada en la maquina.

Figura 33. Efectos de la presión en el cabezal



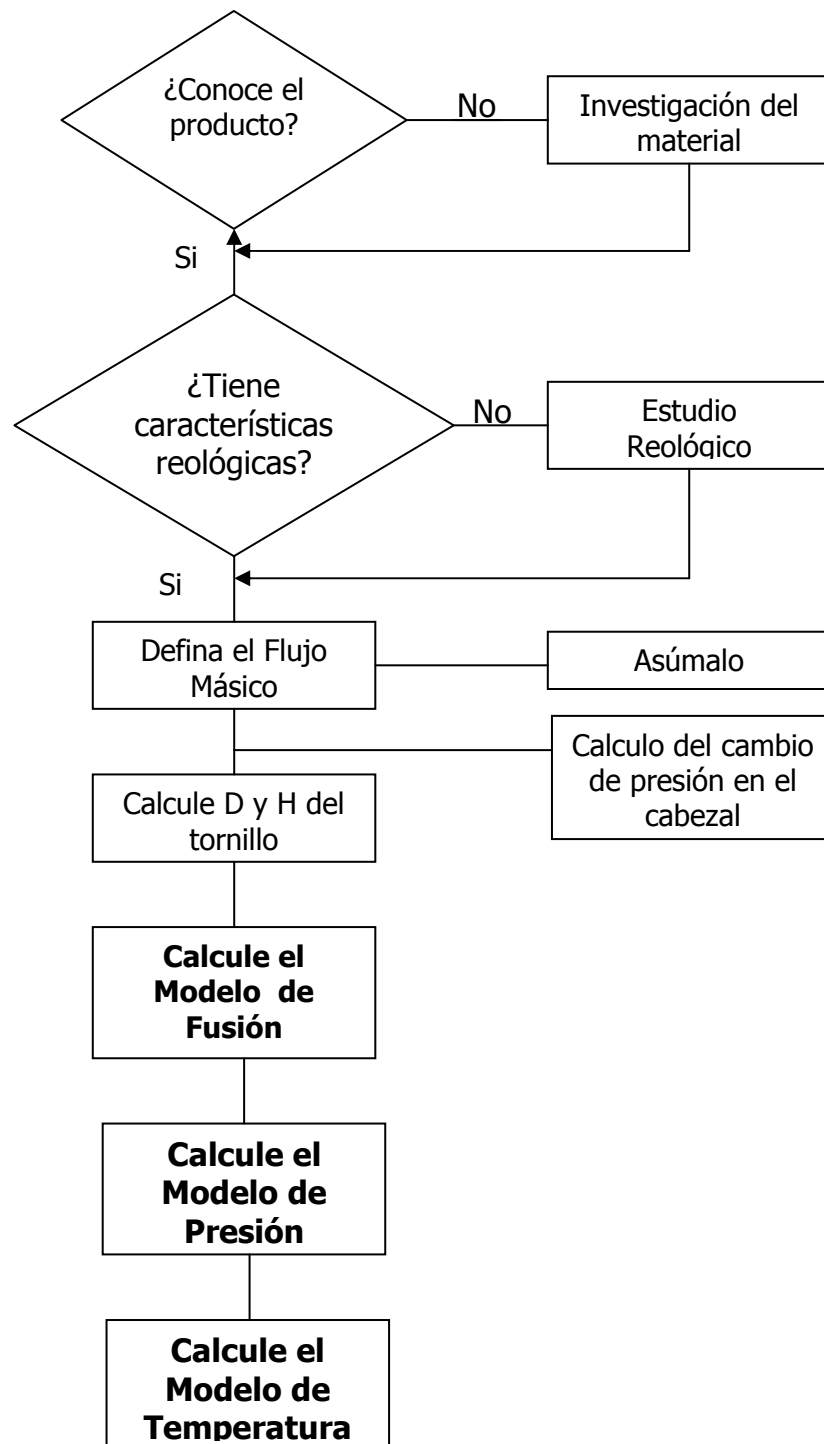
Al tener todos los datos, componentes y cálculos iniciales requeridos, el curso de este modelo incursiona en el estudio del perfil de fusión, siendo este el primero de tres módulos consecutivos a analizar, debe su importancia al hecho de poder conocer el comportamiento del material en el proceso de fusión a través del tornillo extrusor, al conocer que sucede con el material fundido dentro del cilindro, se proporcionan informaciones valiosas que mejoran notablemente las condiciones de proceso y operación, con el fin de poder estandarizarlas con la mayor eficiencia posible; entendamos lo anterior como poder utilizar toda la capacidad de la maquina, se esta produciendo todo lo que se puede?, o si se esta malgastando el potencial.

Con los datos obtenidos con el modelo de fusión, se hace posible calcular el efecto de la presión sobre el material como consecuencia de la compresión del material entre el cilindro y el tornillo, y de la fusión del mismo; Al entender que sucede

con el efecto de la presión sobre el material, facilita un segundo análisis, un aumento grande de presión demandará un mayor consumo de energía para poder fundir y procesar el material polimérico o en el caso contrario se sabrá si la maquina utilizada no podrá hacer el trabajo que se requiere.

El perfil de temperatura se considera el ultimo paso de la metodología, por ser un modelo en vía de desarrollo y sin resultados experimentales conocidos.

Figura 34. Diagrama de flujo de la metodología de diseño



Fuente: Autor

10.1 DESARROLLO DEL MODELO DE FUSIÓN UTILIZANDO EXCEL

Las industrias plásticas de nuestra sociedad interesadas por encontrar las posibles fallas en su proceso de extrusión ignoran el gran desarrollo planteado por un modelo matemático que evitaría elevar los costos de producción por desperdicio. La buena utilización de las ecuaciones planteadas por el modelo y con la ayuda de una herramienta computacional tan sencilla y fácil de utilizar como Excel se lograría llevar un control del proceso de fusión de una maquina extrusora evitando seguir en la rutina del ensayo y error y basándose en conocimientos empíricos del operario. A continuación se muestra la realización de un programa que predice la fusión de cierto polímero.

El programa inicia ingresando una serie de datos de partida o de entrada que serán los puntos de inicio para el cálculo de la fusión; los que se decidieron dividir por categorías, datos del tornillo, del proceso y del material. Se recomienda tener en cuenta el sistema de medición utilizado.

Tabla 1. Datos de entrada del tornillo

DATOS DE ENTRADA DEL TORNILLO			
Ítem	Símbolo	Valor	Unidad
Diámetro externo del tornillo	D	0,05	(m)
Paso diametral	S	0,05	(m)
Altura del filete en la alimentación	H_A	0,012	(m)
Altura del filete en la dosificación	H_D	0,003	(m)
Espesor del filete	e	0,005	(m)
No. espiras en la zona de alimentación	L/D_A	5	Adim
No. espiras en la zona de compresión	L/D_C	15	Adim
No. espiras en la zona de dosificación	L/D_D	5	Adim

Tabla 2. Datos de entrada del proceso

DATOS DE ENTRADA DEL PROCESO			
Ítem	Símbolo	Valor	Unidad
RPS tornillo	rps	0,83	Rev./s
Flujo Másico arrojado	M_k	0,00738	Kg./s
Temperatura del barril	T_b	200	°C
Temperatura del material sólido	T_s	30	°C

Tabla 3. Datos de entrada del material

DATOS ENTRADA DEL MATERIAL			
Ítem	Símbolo	Valor	Unidad
Densidad del sólido	ρ_s	905	Kg./m ³
Densidad del fundido	ρ_m	700	Kg./m ³
Temperatura de fusión	T_m	157	°C
Conductividad térmica del material	K	0,5	W/m °K
Calor específico del sólido	Cp_s	2300	J/ Kg. °K
Calor específico del fundido	Cp_m	2300	J/ Kg. °K
Viscosidad	η	2000	Pa. s
Calor latente de fusión	λ	234000	J/ Kg.

Contando con los parámetros de entrada el siguiente paso es utilizar las ecuaciones matemáticas planteadas por este problema para así encontrar las variables de salida que el programa ofrece, tales como las velocidades del proceso, y las variables necesarias para describir la fusión en cada zona.

Tabla 4. Datos de salida del tornillo

DATOS DE SALIDA DEL TORNILLO			
Ítem	Símbolo	Valor	Unidad
Angulo de hélice	ϕ_B	0,308169071	Rad.
Ancho del canal	W	0,042644526	M
Conicidad interna zona transición	ϕ_i	0,011999424	Rad.

Tabla 5. Velocidades de las interfases

VELOCIDADES			
Ítem	Símbolo	Valor	Unidad
Velocidad relativa del barril	V_b	0,130376095	m/s
Velocidad relativa del barril en x	V_{bx}	0,039544956	m/s
Velocidad relativa del barril en z	V_{bz}	0,124234144	m/s
Velocidad del sólido	V_{sz}	0,01593541	m/s
Velocidad resultante	V_j	0,115292755	m/s

Tabla 6. Datos de salida del proceso

DATOS DE SALIDA DEL PROCESO			
Ítem	Símbolo	Valor	Unidad
Numero de Brighman	Br	1,236504128	Adim
Temperatura media adimensional	$\bar{\theta}$	0,769708677	Adim
Grupo dimensional de fusión	ϕ	0,028277616	
Constante de fusión	ψ	0,001960789	

Los datos de salida del proceso son las variables necesarias para poner en funcionamiento el modelo matemático de la fusión. Se mostrará como funde el polímero en cada una de las zonas del tornillo extrusor.

Tabla 7. Datos de salida de fusión en la zona de alimentación

DATOS DE SALIDA DE FUSION ZONA ALIMENTACIÓN					
Espira Inicio	Espira finalización	X1	Velocidad de fusión	Z2-Z1	X/W
3	4	0,0426	0,00949	0,164845415	0,8738
4	5	0,0372	0,010157	0,164845415	0,7561

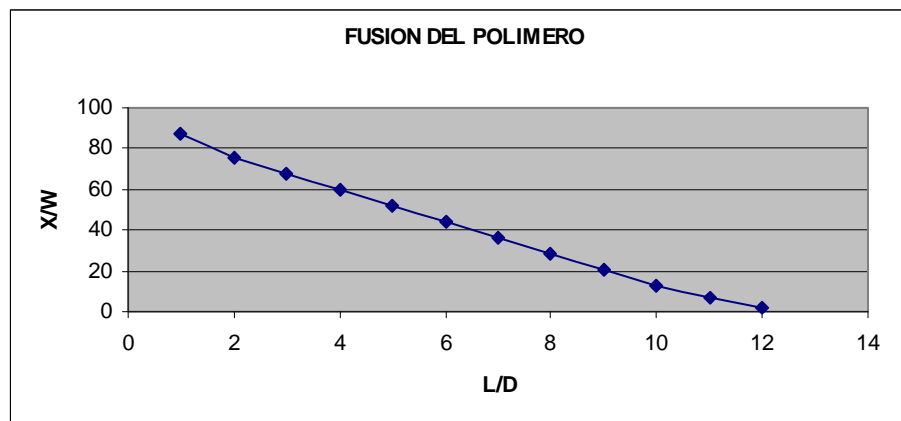
Como se puede observar se inicia el estudio de la fusión desde la tercera espira de acuerdo a las conclusiones arrojadas por los autores. Al final de la zona de alimentación es decir, en la vuelta cinco, se tiene un 76% de material sólido lo que quiere decir que a la zona de compresión entra un 24% de material fundido únicamente.

Tabla 8. Datos de salida de fusión en la zona de compresión

DATOS DE SALIDA DE FUSION ZONA COMPRESION							
Espira Inicio	Espira finalización	H1	X1	Estrechamiento	Velocidad de fusión	H2	X/W
5	6	0,0120	0,0322	0,0036	0,0109	0,011	0,6796
6	7	0,0114	0,0290	0,0036	0,0115	0,011	0,6014
7	8	0,0108	0,0256	0,0036	0,0122	0,010	0,5218
8	9	0,0102	0,0223	0,0036	0,0131	0,010	0,4413
9	10	0,0096	0,0188	0,0036	0,0143	0,009	0,3606
10	11	0,0090	0,0154	0,0036	0,0158	0,008	0,2809
11	12	0,0084	0,0120	0,0036	0,0179	0,008	0,2039
12	13	0,0078	0,0087	0,0036	0,0210	0,007	0,1321
13	14	0,0072	0,0056	0,0036	0,0261	0,007	0,0695
14	15	0,0066	0,0030	0,0036	0,0360	0,006	0,0223
15	16	0,0060	0,0009	0,0036	0,0636	0,005	0,0000
16	17	0,0054	0,0000	0,0036	0,5880	0,005	0,0000
17	18	0,0048	0,0008	0,0036	0,0673	0,004	0,0000
18	19	0,0042	0,0000	0,0036	0,3245	0,004	0,0000
19	20	0,0036	0,0013	0,0036	0,0535	0,003	0,0000

En la zona de compresión desde la 5 espira la relación X/W va disminuyendo proporcionalmente como la velocidad de fusión va aumentando. En la vuelta 14 se encuentra solamente el 2% de polímero sólido y aun no se ha acabado la zona de compresión, lo que nos lleva a pensar que las condiciones de la maquina están siendo desaprovechadas para este polímero. Con un programa de estos tan sencillo de hacer una empresa plástica puede controlar y mejorar la utilización de las variables del proceso aumentando la eficiencia de su maquina extrusora, como es el caso de elevar o disminuir las velocidades de flujo.

Figura 35. Comportamiento de la fusión por medio de un modelo matemático.



10.2 DESARROLLO DEL MODELO DE PRESION UTILIZANDO EXCEL

El desarrollo del modelo de presión fue realizado experimentalmente en el Instituto del plástico y el caucho en la universidad de EAFIT de Medellín, la práctica se realizo utilizando un tornillo de barrera debido a que estaba previsto en el cronograma de la universidad. Los cálculos matemáticos del cambio en la presión y la presión conseguida dentro del barril, se hacen para un tornillo de barrera.

Tabla 9. Geometría del tornillo de barrera utilizado en los cálculos.

DIMENSIONES		
Ítem	Valor	Unidad
Diámetro del tornillo	0,0889	m
Numero de espiras efectivas totales del tornillo	26,79	Vueltas
Sección de alimentación	6,5	Vueltas
Sección de compresión	14,9	Vueltas
Sección de dosificación	5,39	Vueltas
Profundidad inicial del canal de los sólidos	0,01461	m
Profundidad final del canal de los sólidos	0,00521	m
Profundidad inicial del canal del fundido	0.01400	m
Profundidad final del canal del fundido	0.00500	m
Espesor del filete	0,00889	m
Luz de barrera	0,00009	m

Tabla 10. Datos del proceso

Datos de entrada del proceso		
Ítem	Valor	Unidad
Flujo másico	4.3×10^{-5}	Kg/s
Velocidad del tornillo	72.5	r.p.s.
Vueltas de análisis	0.5	Vueltas

El tornillo en análisis posee alrededor de 30 espiras, los cálculos realizados se hicieron a partir de la tercera espira, en la tabla 12 la espira de inicio es la tercera, debido a que es en esta vuelta en donde empieza el proceso de fusión según los resultados obtenidos por Noriega; se calcula la presión cada media vuelta o espira con el fin de observar más de cerca el comportamiento de la presión dentro del barril a medida que el material transcurre por las zonas del tornillo.

De los datos del tornillo, se puede verificar que la zona de alimentación posee un diámetro constante a través de sus 6.5 espiras y por consiguiente la altura del filete también permanece constante, se encuentra variación del diámetro y la altura del filete al entrar en la zona de compresión, para posteriormente volver a estabilizar el diámetro y la altura del filete en la zona final o de dosificación.

La practica de laboratorio se realizo teniendo en cuenta ciertos parámetros de operación, como el funcionamiento a 43.5 rpm, debido a que esta es una variable de operación de suma importancia como se demostró en el modelo de fusión; Se le permitió a la maquina extrusora estabilizar su flujo durante un tiempo considerable para proceder a determinar el flujo volumétrico mediante mediciones directas en la extrusora, se obtuvo midiendo el *output* arrojado por unidad de tiempo.

Tabla 11. Datos Experimentales

L/D	Bar
9,0	100
10,3	150
16,0	295
18,7	330
21,5	349
22,8	350
24,8	290
27,4	230
30,0	220

Tabla 12. Aumento de presión en la zona de Alimentación

L/D	H (m)	S [m]	ϕ_b [Deg]	ϕ_m [Deg]	W [m]	Vbz [m/s]	Fd	Fp	η	ΔP	P	Área
1,0	0,015	0,0889	17,66	20,85	0,076	0,193	0,889	0,879	1753			0,0011
1,5	0,015	0,0889	17,66	20,85	0,076	0,193	0,889	0,879	1753	6,354	6	0,0011
2,0	0,015	0,0889	17,66	20,85	0,076	0,193	0,889	0,879	1753	6,354	13	0,0011
2,5	0,015	0,0889	17,66	20,85	0,076	0,193	0,889	0,879	1753	6,354	19	0,0011
3,0	0,015	0,0889	17,66	20,85	0,076	0,193	0,889	0,879	1753	6,354	25	0,0011
3,5	0,015	0,0889	17,66	20,85	0,076	0,193	0,889	0,879	1753	6,354	32	0,0011
4,0	0,015	0,0889	17,66	20,85	0,076	0,193	0,889	0,879	1753	6,354	38	0,0011
4,5	0,015	0,0889	17,66	20,85	0,076	0,193	0,889	0,879	1753	6,354	44	0,0011
5,0	0,015	0,0889	17,66	20,85	0,076	0,193	0,889	0,879	1753	6,354	51	0,0011
5,5	0,015	0,0889	17,66	20,85	0,076	0,193	0,889	0,879	1753	6,354	57	0,0011
6,0	0,015	0,0889	17,66	20,85	0,076	0,193	0,889	0,879	1753	6,354	64	0,0011
6,5	0,015	0,0889	17,66	20,85	0,076	0,193	0,889	0,879	1753	6,354	70	0,0011

Tabla 13. Aumento de presión en la zona de Compresión

L/D	H (m)	S [m]	ϕ_b [Deg]	ϕ_m [Deg]	W [m]	Vbz [m/s]	Fd	Fp	η	ΔP	P	Área
7,0	0,014	0,089	17,66	20,77	0,076	0,193	0,892	0,882	1753	6,142	76	0,00108
7,5	0,014	0,089	17,66	20,69	0,076	0,193	0,895	0,885	1753	6,328	82	0,00106
8,0	0,014	0,089	17,66	20,61	0,076	0,193	0,897	0,887	1753	6,519	89	0,00104
8,5	0,013	0,089	17,66	20,53	0,076	0,193	0,899	0,890	1753	6,713	96	0,00101
9,0	0,013	0,089	17,66	20,46	0,076	0,193	0,902	0,893	1753	6,911	103	0,00099
9,5	0,013	0,089	17,66	20,38	0,076	0,193	0,904	0,895	1753	7,111	110	0,00096
10,0	0,012	0,089	17,66	20,30	0,076	0,193	0,907	0,898	1753	7,312	117	0,00094
10,5	0,012	0,089	17,66	20,22	0,076	0,193	0,909	0,900	1753	7,514	124	0,00092
11,0	0,012	0,089	17,66	20,15	0,076	0,193	0,911	0,903	1753	7,713	132	0,00089
11,5	0,011	0,089	17,66	20,07	0,076	0,193	0,914	0,906	1753	7,909	140	0,00087
12,0	0,011	0,089	17,66	20,00	0,076	0,193	0,916	0,908	1753	8,097	148	0,00084
12,5	0,011	0,089	17,66	19,92	0,076	0,193	0,918	0,911	1753	8,275	156	0,00082
13,0	0,011	0,089	17,66	19,85	0,076	0,193	0,921	0,913	1753	8,437	165	0,00080
13,5	0,010	0,089	17,66	19,78	0,076	0,193	0,923	0,916	1753	8,578	173	0,00077
14,0	0,010	0,089	17,66	19,70	0,076	0,193	0,926	0,919	1753	8,690	182	0,00075
14,5	0,010	0,089	17,66	19,63	0,076	0,193	0,928	0,921	1753	8,764	191	0,00073
15,0	0,009	0,089	17,66	19,56	0,076	0,193	0,930	0,924	1753	8,787	200	0,00070
15,5	0,009	0,089	17,66	19,49	0,076	0,193	0,933	0,926	1753	8,744	208	0,00068
16,0	0,009	0,089	17,66	19,42	0,076	0,193	0,935	0,929	1753	8,614	217	0,00065
16,5	0,008	0,089	17,66	19,35	0,076	0,193	0,937	0,932	1753	8,372	225	0,00063
17,0	0,008	0,089	17,66	19,28	0,076	0,193	0,940	0,934	1753	7,985	233	0,00061
17,5	0,008	0,089	17,66	19,21	0,076	0,193	0,942	0,937	1753	7,408	241	0,00058
18,0	0,007	0,089	17,66	19,14	0,076	0,193	0,945	0,939	1753	6,585	247	0,00056
18,5	0,007	0,089	17,66	19,07	0,076	0,193	0,947	0,942	1753	5,441	253	0,00053
19,0	0,007	0,089	17,66	19,00	0,076	0,193	0,949	0,945	1753	3,873	257	0,00051
19,5	0,006	0,089	17,66	18,93	0,076	0,193	0,952	0,947	1753	1,748	258	0,00049
20,0	0,006	0,089	17,66	18,87	0,076	0,193	0,954	0,950	1753	-1,119	257	0,00046
20,5	0,006	0,089	17,66	18,80	0,076	0,193	0,956	0,952	1753	-4,980	252	0,00044
21,0	0,005	0,089	17,66	18,73	0,076	0,193	0,959	0,955	1753	-10,188	242	0,00041

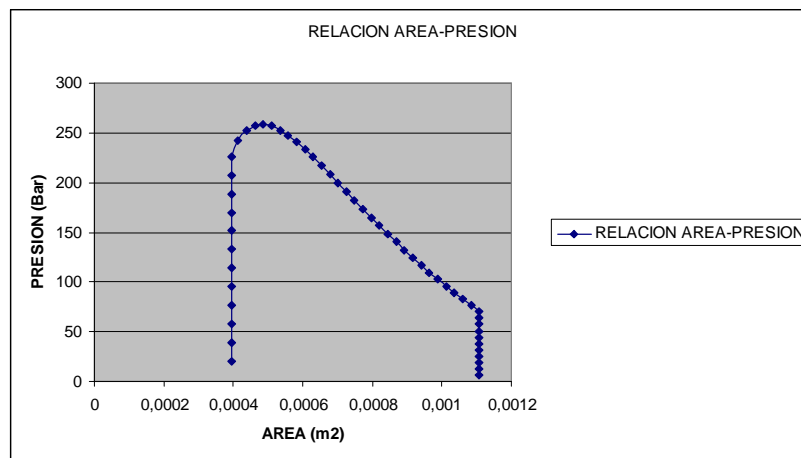
Tabla 14. Aumento de presión en la zona de dosificación

L/D	H (m)	S (m)	ϕ_b [Deg]	ϕ_m [Deg]	W (m)	Vbz [m/s]	Fd	Fp	η	ΔP	P	Área
21,50	0,01	0,09	17,66	18,68	0,08	0,19	0,96	0,96	1753,00	-16,20	225,99	0,0004
22,00	0,01	0,09	17,66	18,68	0,08	0,19	0,96	0,96	1753,00	-18,67	207,32	0,0004
22,50	0,01	0,09	17,66	18,68	0,08	0,19	0,96	0,96	1753,00	-18,67	188,65	0,0004
23,00	0,01	0,09	17,66	18,68	0,08	0,19	0,96	0,96	1753,00	-18,67	169,98	0,0004
23,50	0,01	0,09	17,66	18,68	0,08	0,19	0,96	0,96	1753,00	-18,67	151,31	0,0004
24,00	0,01	0,09	17,66	18,68	0,08	0,19	0,96	0,96	1753,00	-18,67	132,64	0,0004
24,50	0,01	0,09	17,66	18,68	0,08	0,19	0,96	0,96	1753,00	-18,67	113,97	0,0004
25,00	0,01	0,09	17,66	18,68	0,08	0,19	0,96	0,96	1753,00	-18,67	95,30	0,0004
25,50	0,01	0,09	17,66	18,68	0,08	0,19	0,96	0,96	1753,00	-18,67	76,64	0,0004
26,00	0,01	0,09	17,66	18,68	0,08	0,19	0,96	0,96	1753,00	-18,67	57,97	0,0004
26,50	0,01	0,09	17,66	18,68	0,08	0,19	0,96	0,96	1753,00	-18,67	39,30	0,0004
27,00	0,01	0,09	17,66	18,68	0,08	0,19	0,96	0,96	1753,00	-18,67	20,63	0,0004

En las tablas 12, 13, 14 se muestra el aumento de la presión en las zonas de alimentación, compresión y dosificación respectivamente. En la zona de transición se presentan las variaciones del diámetro y de altura del filete, estas variables son las causantes del aumento considerable de la presión en esta zona.

Al graficar la variación de la presión contra el área del canal de las tablas 12 – 13 - 14, se observa de la figura 36, que dentro de la zona de alimentación en donde el diámetro del tornillo es constante y no varía el área del canal, se obtiene un aumento de la presión debido al inicio del proceso de fusión.

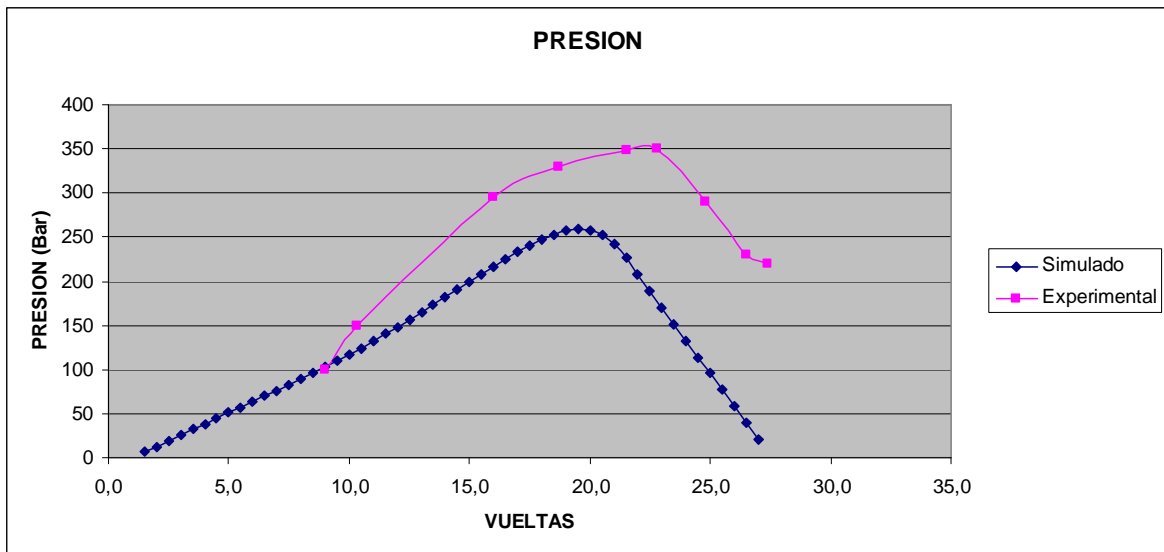
Figura 36. Relación área Vs. Presión



En la zona de transición o compresión en donde las variables H y D varían, se observa un aumento notable de la presión el cual es inversamente proporcional con el área del canal. En dosificación, el área se vuelve constante porque se mantiene el diámetro del tornillo y se observa una caída de la presión considerable, debido a que la fusión en su mayor porcentaje ya ocurrió, lo cual no genera un alza en la presión.

Al comparar la caída de presión experimental, con la calculada se encuentra una desviación entre las dos gráficas, debido a que en la práctica la medición de la presión se realizó según las distancias de los sensores como se muestra en la tabla 11, por otro lado un modelo newtoniano no considera el cambio en la viscosidad, por lo tanto generará una causa de error notable.

Figura 37. Aumento de la presión a medida que avanza por el tornillo



10.3 DESARROLLO DEL MODELO DE TEMPERATURA UTILIZANDO EXCEL

El modelo de la temperatura como lo habíamos precisado anteriormente debe tener un mayor compromiso por parte de la industria y de la educación para profundizar mas en este gran campo, sin embargo las bases planteadas en este documento fueron realizadas por personas muy interesadas en este tema.

Como en los casos anteriores, la temperatura fue simulada en Excel obteniendo unos resultados parciales de comportamiento de esta en el desarrollo longitudinal del tornillo extrusor.

Tabla 15. Datos de entrada para el modelamiento de la temperatura

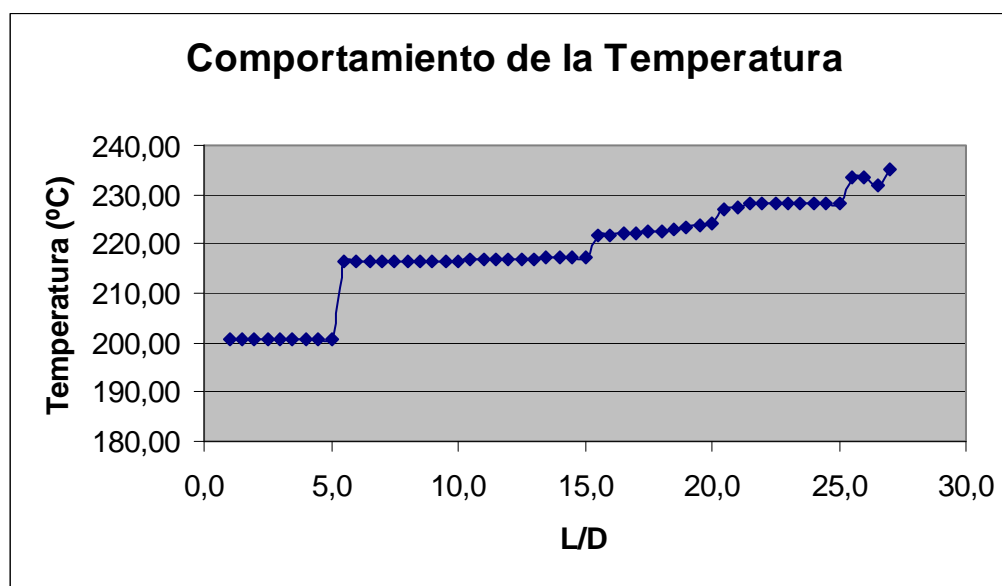
Datos de Entrada	
A	3978,38124
B	0,18931702
C	0,65740009
U	45590,9055
Angulo de Hélice	17.66
Paso Diametral	0.0889m
Coeficiente de transferencia	0.5
Temperatura de Fusión	200
Densidad del fundido	700

Tabla 16. Resultados Obtenidos

L/W	H	W	a_t	η	γ_{eff}	T_z	ΔZ	$T_{z+\Delta z}$
1,0	0,01461	0,07582	2,22477528	2570	12,29	200	0,09330	200,58
1,5	0,01461	0,07582	2,22477528	2570	12,29	200	0,09330	200,58
2,0	0,01461	0,07582	2,22477528	2570	12,29	200	0,09330	200,58
2,5	0,01461	0,07582	2,22477528	2570	12,29	200	0,09330	200,58
3,0	0,01461	0,07582	2,22477528	2570	12,29	200	0,09330	200,58
3,5	0,01461	0,07582	2,22477528	2570	12,29	200	0,09330	200,58
4,0	0,01461	0,07582	2,22477528	2570	12,29	200	0,09330	200,58
4,5	0,01461	0,07582	2,22477528	2570	12,29	200	0,09330	200,58
5,0	0,01461	0,07582	2,22477528	2570	12,29	200	0,09330	200,58
5,5	0,01461	0,07582	1,27960024	1982	12,29	216	0,09330	216,45
6,0	0,01461	0,07582	1,27960024	1982	12,29	216	0,09330	216,45
6,5	0,01461	0,07582	1,27960024	1982	12,29	216	0,09330	216,45
7,0	0,01429	0,07582	1,27960024	1960	12,84	216	0,09330	216,47
7,5	0,01398	0,07582	1,27960024	1938	13,43	216	0,09330	216,50
8,0	0,01366	0,07582	1,27960024	1916	14,05	216	0,09330	216,53
8,5	0,01335	0,07582	1,27960024	1893	14,73	216	0,09330	216,56
9,0	0,01303	0,07582	1,27960024	1870	15,45	216	0,09330	216,60
9,5	0,01272	0,07582	1,27960024	1847	16,22	216	0,09330	216,63
10,0	0,01240	0,07582	1,27960024	1823	17,06	216	0,09330	216,67
10,5	0,01209	0,07582	1,37125219	1859	17,96	216	0,09330	216,74
11,0	0,01177	0,07582	1,37125219	1833	18,94	216	0,09330	216,79
11,5	0,01146	0,07582	1,37125219	1806	19,99	216	0,09330	216,85
12,0	0,01114	0,07582	1,37125219	1780	21,14	216	0,09330	216,91
12,5	0,01082	0,07582	1,37125219	1752	22,39	216	0,09330	216,97
13,0	0,01051	0,07582	1,37125219	1724	23,76	216	0,09330	217,05
13,5	0,01019	0,07582	1,37125219	1696	25,25	216	0,09330	217,13
14,0	0,00988	0,07582	1,37125219	1667	26,89	216	0,09330	217,22
14,5	0,00956	0,07582	1,37125219	1637	28,69	216	0,09330	217,32
15,0	0,00925	0,07582	1,37125219	1607	30,69	216	0,09330	217,43
15,5	0,00893	0,07582	1,57880908	1677	32,89	220	0,09330	221,66
16,0	0,00862	0,07582	1,57880908	1643	35,3	220	0,09330	221,81
16,5	0,00830	0,07582	1,57880908	1608	38,08	220	0,09330	221,98
17,0	0,00799	0,07582	1,57880908	1572	41,15	220	0,09330	222,17
17,5	0,00767	0,07582	1,57880908	1536	44,60	220	0,09330	222,40
18,0	0,00735	0,07582	1,57880908	1499	48,51	220	0,09330	222,65
18,5	0,00704	0,07582	1,57880908	1461	52,96	220	0,09330	222,95
19,0	0,00672	0,07582	1,57880908	1422	58,049	220	0,09330	223,30
19,5	0,00641	0,07582	1,57880908	1383	63,904	220	0,09330	223,70
20,0	0,00609	0,07582	1,57880908	1342	70,69	220	0,09330	224,18
20,5	0,00578	0,07582	1,69634052	1338	78,62	222	0,09330	226,89
21,0	0,00546	0,07582	1,69634052	1293	87,96	222	0,09330	227,59
21,5	0,00521	0,07582	1,69634052	1257	96,69	222	0,09330	228,26
22,0	0,00521	0,07582	1,69634052	1257	96,69	222	0,09330	228,26
22,5	0,00521	0,07582	1,69634052	1257	96,69	222	0,09330	228,26

23,0	0,00521	0,07582	1,69634052	1257	96,69	222	0,09330	228,26
23,5	0,00521	0,07582	1,69634052	1257	96,69	222	0,09330	228,26
24,0	0,00521	0,07582	1,69634052	1257	96,69	222	0,09330	228,26
24,5	0,00521	0,07582	1,69634052	1257	96,69	222	0,09330	228,26
25,0	0,00521	0,07582	1,69634052	1257	96,69	222	0,09330	228,26
25,5	0,00521	0,07582	1,86941637	1306	96,69	227	0,09330	233,50
26,0	0,00521	0,07582	1,86941637	1306	96,69	227	0,09330	233,50
26,5	0,00521	0,07582	1	1013	96,69	227	0,09330	232,05
27,0	0,00521	0,07582	1	1013	96,69	227	0,09330	235,05

Figura 38. Comportamiento de la Temperatura simulada



11 CONCLUSIONES

El modelo de fusión es una herramienta matemática que exige a las industrias plásticas de invertir en costosos experimentos con el fin de encontrar las posibles fallas en el proceso de fusión. Con unos datos claros y confiables de las propiedades físicas y térmicas del material a procesar se pueden variar las condiciones de proceso con el fin de encontrar las variables estándar que elevarían la eficiencia de la maquina extrusora.

El modelo de presión al ser simulado presento una tendencia o comportamiento similar al experimentado por la maquina. Sin embargo presenta un grado de error al encontrarse aun lejos de la realidad.

El modelo matemático de la temperatura es un proceso en vía de desarrollo, es necesario contar con el interés de las industrias para realizar la comprobación científica de este desarrollo, hay que tener en cuenta que la temperatura es una de las principales variables del proceso más difíciles de controlar y de las más costosas.

El diseño del tornillo debe optimizar estos tres modelos con el fin de tener un proceso eficiente tanto en producción como en calidad.

12 RECOMENDACIONES

La relación de compresión dada por la zona de alimentación y de dosificación no debe obviada, se de tener en cuenta la recomendación dada para cada material.

Se recomienda analizar los modelos propuestos teniendo en cuenta un comportamiento de la viscosidad Pseudoplástica para así eliminar el mínimo porcentaje de error encontrado con los newtonianos.

Un tornillo extrusor debe ser diseñado para unas gamas de reologías y cabezales o dados estrechos.

El efecto de la variación de la temperatura y la velocidad de cizalladura en la reología del material tienen una consecuencia significativa en la viscosidad del material y en el diseño del tornillo; por este motivo no se debe despreciar en el modelo de presión.

La confiabilidad de los datos de entrada para el modelo de fusión debe ser la apropiada para disminuir el porcentaje de error en los resultados.

No se debe omitir ninguno de los pasos de la metodología, ni descuidar ninguno de los elementos constituyentes de esta, ya que son dependientes el uno del otro.

BIBLIOGRAFÍA

ACOPLASTICOS. Plásticos en Colombia 2002 - 2003. En: Revista Acoplásticos. Vol. 2, No 1 (Feb. 2002); p. 6 - 7.

ANGUITA DELGADO, Ramón. Extrusión de Plásticos: Teoría y equipos. Madrid: Hermann Blume, 1977. 247 p. ISBN 842141187

CASTILLO, Ramón; STRUTT David y VLACHOPOULOS John. En: Análisis y Diseño de procesos de polímeros: Computer Aident. Vol. 2; p. 1-5

CASTILLO, Ramón; STRUTT, David y VLACHOPOULOS, John. Experiment and Simulation with Barrier Screws. Ontario, 2002. 5 p.

ESTRADA, Omar. Exposición extrusión monohusillo y doblehusillo. Medellín: ICIPC, 2002. 178 p.

NORIEGA, Maria del Pilar. Presentación Review of Melting in Single Screw Extruders. Medellín: ICIPC, 2005. 19 p.

RAMOS, Luis. Extrusión de Plásticos: Principios básicos. Saltillo: Limusa Noriega Editores, 2000. 188 p. ISBN 9681845048.

STANDARD, Davis. Know your extruder. En: Wire Tech Magazine. Vol. 1, No 1. (Ene. 1999); p. 1 – 19.

TADMOR, Zehev. Principles of polymer processing. New York: A Wiley, 1979. 737 p. ISBN 0471843202.

VERA MONDRAGÓN, Bairo. Diseño y construcción de una Extrusora de laboratorio. Santiago de Cali, 1996. 320 p. Trabajo de grado (Ingeniero Mecánico). Universidad Autónoma de Occidente. Facultad de Ingenierías.

WOMER, Timothy W. Lo que usted debe saber sobre diseños de Tornillos [en línea]. EEUU: Xaloy Inc. 2005. [consultado 04 de Febrero, 2006]. Disponible en Internet: <http://www.plastico.com/>.

Anexo 1. Teorema de Stokes

El teorema de Stokes en geometría diferencial es una proposición sobre la integración de formas diferenciales que generaliza varios teoremas del cálculo vectorial. Se nombra así por George Gabriel Stokes (1819-1903).

Sea M una variedad de dimensión n diferenciable por trozos orientada compacta y sea ω una forma diferencial en M de grado $n-1$ y de clase C^1 . Si ∂M denota el límite de M con su orientación inducida, entonces,

$$\int_M d\omega = \int_{\partial M} \omega$$

Aquí d es la derivada exterior, que se define usando solamente la estructura de variedad. El teorema debe ser considerado como generalización del teorema fundamental del cálculo y, de hecho, se prueba fácilmente usando este teorema.

El teorema se utiliza a menudo en situaciones donde M es una subvariedad orientada sumergida en una variedad más grande en la cual la forma ω se define.

El teorema se extiende fácilmente a las combinaciones lineales de las subvariedades diferenciables por trozos, las, así llamadas, cadenas. El teorema de Stokes demuestra entonces que las formas cerradas definidas módulo una forma exacta se pueden integrar sobre las cadenas definidas módulo borde. Ésta es la base para el apareamiento entre los grupos de homología y la cohomología de de Rham.